

**Universidad Politécnica de Madrid**  
**Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica**



**ESTUDIO SOBRE LA VIABILIDAD DE LA  
INTRODUCCIÓN DE NUEVOS MATERIALES A BASE DE  
TITANIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE FACHADAS**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Irene González Morán**

2011



**Universidad Politécnica de Madrid**  
**Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica**

**Máster en innovación tecnológica en edificación**  
**(Itinerario investigador)**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**ESTUDIO SOBRE LA VIABILIDAD DE LA**  
**INTRODUCCIÓN DE NUEVOS MATERIALES A BASE DE**  
**TITANIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE FACHADAS**

Autor  
**Irene González Morán**

Directores  
**Dr. Francisco Fernández Martínez**  
**Dr. Mercedes del Río Merino**

Subdirección de Investigación, Doctorado y Postgrado

2011

## Resumen

Este trabajo fin de máster consiste en el estudio sobre la viabilidad de introducir nuevos materiales a base de titanio en elementos que son componentes de la fachada.

La idea surge del tema de un trabajo ya realizado sobre la búsqueda de nuevos materiales para la sustitución del aluminio de los elementos estructurales (montantes y travesaños) de muros cortina, debido a su mal comportamiento térmico. En esa búsqueda se proponen tres tipos de materiales, uno de los cuales son el titanio y sus aleaciones.

En el presente trabajo se pretende pues comprobar la posibilidad y la eficacia de la sustitución de las partes de aluminio en los muros cortina por aleaciones de titanio.

Pero además se propone el uso de titanio como revestimiento de algunas partes opacas del muro cortina o de otro tipo de fachadas, aunque no es la primera que se usa este material en fachadas. La nueva introducción sería añadir un revestimiento de dióxido de titanio para aprovechar que es uno de los materiales que soportan la fotocatalisis. Sobre la superficie de Ti metálico (sustrato), mediante oxidación superficial se propone sintetizar una delgada capa de  $\text{TiO}_2$ . Se trata de obtener sobre un soporte metálico de Ti, una superficie de  $\text{TiO}_2$  variedad Anatasa, que cumpliría con los requisitos "internos" del Ti y con los externos como material fotocatalítico soportado. Sin embargo esta propuesta no se lleva a cabo en este trabajo, si no que se propone como futura línea de investigación.

El procedimiento para llegar al objetivo de este trabajo, que es principalmente el estudio de la viabilidad del titanio para muros cortina y otro tipo de fachadas, se compone de varios pasos:

1. Se lleva a cabo una búsqueda y análisis sobre uso del titanio como material de construcción. Entonces se realiza una compilación y análisis de las propiedades, en especial sobre su punto de fusión, densidad, resistencia, dureza y conductividad térmica. Además se evalúa para revestimientos metálicos o sándwich y para muros cortina.
2. Se realiza un capítulo sobre los antecedentes y un estado del arte para encontrar estudios actuales sobre el titanio y sobre el dióxido de titanio. Se encuentran varios estudios en los que se comprueba la efectividad del dióxido de titanio para reducir algunas sustancias nocivas en el aire. Además se buscan y recopilan edificios en los que ya se ha usado titanio como revestimiento de la fachada, aunque no se encuentran ningún índice del uso de titanio para muros cortina.
3. En el desarrollo del trabajo se compara el titanio con el aluminio en muros cortina, sobre todo se realizan simulaciones para comparar el comportamiento térmico de estos dos materiales con material informático específico. Importante es también el estado del coste del titanio y sus posibilidades de reducirse. Por esta razón existe un capítulo dedicado en particular a este aspecto.

Finalmente se muestran los resultados y las conclusiones que se pueden sacar de este trabajo y se discuten éstos. Del resultado de éstas se proponen varias líneas de investigación futuras que se muestran al final de este trabajo.

## **Abstract**

The Master Thesis is about the study of the feasibility of the introduction of titanium-based materials as elements that are components of the façade.

The idea of this study is based on the research of new materials that can replace aluminum in the load-bearing structures (mullion and transom) of curtain walls, due to its poor thermal performance. At the end of the study, three types of materials were under consideration, one of them being titanium and its alloys.

The main aim of this investigation is to prove the possibility and effectiveness of replacing aluminum with titanium alloys in curtain walls.

However, the use of titanium cladding for other type of façades or even for other parts of the curtain wall, which are opaque, is also under discussion. It would not be the first time that titanium was used in façades, but the innovation would be the addition of a coating of titanium dioxide in order to take advantage of its ability to support photocatalysis. It has been proposed that on the surface of the metal of Ti (substrate) there would be a thin layer of  $\text{TiO}_2$  synthesized by surface oxidation. It would be applied to a titanium metal sheet, a surface of a variety of  $\text{TiO}_2$  (Anatase), so that the whole ensemble would fulfill the "internal" requirements with titanium and the external ones from the anatase as a supported photocatalytic material. However, this proposal has not been achieved in this study, but it has been proposed as a future line of research.

The adopted procedure in order to reach the objective of this work, which is mainly the study of the feasibility of using titanium for curtain walls and other façades, consists of several steps:

1. A study and analysis on the use of titanium as construction material. Moreover, a compilation and analysis of the properties, especially its melting point, density, strength, hardness and thermal conductivity is also made. It has also been evaluated for a metal cladding or sandwich-panels and for curtain walls.
2. A chapter in the study on the state of the art in order to find current studies on titanium and titanium dioxide. There are several studies that prove the effectiveness of titanium dioxide in reducing some pollutants in the air. It was conducted in a collection of buildings, where titanium has been used as a façade coating, although there were no findings about the use of titanium for curtain walls.
3. Another chapter on the comparison between titanium and aluminum for curtain walls, including certain simulations to compare the thermal behavior of these two materials with the help of a computer program. Equally important it is also the cost of titanium and its chances of being reduced. For this reason there is a chapter specifically dedicated to this aspect.

Finally, the results and conclusions that can be drawn from this work have been shown and discussed. As a result of these conclusions and results, some future research lines have been proposed and shown at the end of this study.

## Índice general

Resumen.....	i
Abstract.....	iii
Índice general.....	v
Siglas .....	vii
1    Introducción .....	1
2    Justificación y objetivos del trabajo de investigación .....	5
2.1    Justificación .....	5
2.2    Objetivo principal .....	5
2.3    Objetivos específicos.....	6
2.3.1    Análisis y viabilidad del titanio para material de construcción ...	6
2.3.2    Búsqueda de requisitos necesarios para los muros cortina .....	6
2.3.3    Combinación del titanio con el TiO <sub>2</sub> en futuras líneas de investigación .....	7
3    Análisis del titanio como material de construcción .....	8
3.1    Aleaciones de titanio .....	9
3.2    Propiedades de las aleaciones de titanio .....	11
3.2.1    Punto de fusión .....	14
3.2.2    Densidad, resistencia y dureza .....	15
3.2.3    Conductividad.....	17
3.3    Aplicación de elementos de titanio en fachadas.....	21
3.3.2    Fachadas con revestimientos metálicos o sándwich.....	21
3.3.3    Muros cortina.....	23
4    Definiciones y fundamentos teóricos .....	24
4.1    Proceso de Kroll .....	24
4.2    Proceso de FCC Cambridge .....	25



4.3	Catálisis.....	27
4.4	Fotocatális.....	27
4.5	Rutilo.....	27
4.6	Anatasa.....	28
4.7	Proceso sol-gel.....	29
5	Antecedentes y estado del arte.....	30
5.1	Antecedentes históricos.....	30
5.2	Estudios actuales.....	40
5.2.1	Sobre el titanio y sus aleaciones.....	40
5.2.2	Sobre el dióxido de titanio y revestimientos.....	45
5.3	Conclusiones de los antecedentes.....	48
6	Planteamiento metodológico y estructura del trabajo.....	49
7	Desarrollo del trabajo.....	51
7.1	Estudio sobre titanio para muros cortina.....	51
7.2	Comparativa del titanio con el aluminio en muros cortina.....	56
7.3	Análisis sobre el precio del titanio.....	76
8	Resultados obtenidos.....	84
8.1	Estudio sobre titanio para muros cortina y conclusiones parciales.....	84
8.2	Comparativa del titanio con el aluminio en muros cortina y conclusiones parciales.....	86
8.3	Análisis sobre el precio del titanio y conclusiones parciales.....	88
9	CONCLUSIONES.....	89
10	Futuras líneas de investigación.....	91
10.1	Revestimientos con TiO <sub>2</sub> en chapa de titanio.....	91
10.2	Estudios sobre el funcionamiento del TiO <sub>2</sub> sobre el titanio.....	92
10.2.1	Ensayos sobre el comportamiento catalítico.....	93
10.2.2	Propiedades de titanio más el revestimiento de TiO <sub>2</sub> .....	94
10.3	Variación del color en función del ángulo de incidencia que presenta el Ti metálico con una capa de TiO <sub>2</sub> .....	94
10.4	Revestimiento de TiO <sub>2</sub> en fachadas de aluminio.....	94
	Bibliografía.....	95

## Siglas

$U_f$  = Transmitancia del marco en una ventana o un muro cortina

$R_{si}$  = Resistencia superficial interior

$R_{se}$  = Resistencia superficial exterior

## 1 INTRODUCCIÓN

La idea inicial para el tema del trabajo de Fin de Máster surge del tema de un trabajo Fin de Máster realizado dentro del programa Máster International Facade Design and Construction en la universidad Hochschule Ostwestfalen-Lippe situada en Detmold, Alemania.

Dicho trabajo desarrolla la problemática del aluminio en las fachadas ligeras de montantes y travesaños, también llamadas muro cortina. El aluminio, por detrás de otros materiales como el acero, la madera o el acero inoxidable, es el material más utilizado para la realización de la estructura (montantes y travesaños) de los muros cortina. El aluminio presenta unas propiedades que le hacen ser el mejor de todos los materiales para este tipo de función.

El problema que presenta del aluminio como elemento constructivo es el alto valor de su coeficiente de conductividad térmica, que genera muchas pérdidas energéticas por transmisión de calor y que además aumenta en climas fríos y que ha de adecuarse a las nuevas normativas de edificación.

En la actualidad los requisitos que debe reunir un material para ser utilizado en el conjunto de la envolvente de un edificio en relación a su aislamiento térmico son muy estrictos y lo serán aún más, debido a que se pretende minimizar el gasto energético. Consecuentemente se busca una reducción de combustible que evite el agotamiento de las fuentes de energía primarias y evitar al mismo tiempo la producción de sustancias contaminantes en el aire.

En Alemania la normativa EnEV de 2009 de regulación del ahorro energético, establece como límite de referencia  $U_{cw} = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  (el límite de valor U para muros cortina) y el  $U_f$  tiene que ser  $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  o menor. Pero en la EnEV de 2012 este valor se reducirá a  $U_{cw} \leq 1,01 \text{ W/m}^2\text{K}$  y el  $U_f$  tiene que ser  $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  o menos. En 2015 en la EnEV el límite estará en  $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Este estudio previo se realizó con y para la empresa de ventanas, fachadas y sistemas de captación de energía solar Schüco cuya sede principal se encuentra en Bielefeld, Alemania.

El  $U_f$  mínimo que la empresa Schüco había alcanzado en 2007 era de  $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Lo que significa que sólo podrían estar fabricando fachadas dentro de los límites permitidos hasta el 2015. Como se preveía que la EnEV alemana bajaría este límite en menos de 10 años, necesitaban buscar otro material distinto del aluminio, para tener un margen que les permitiese cumplir en los próximos años esta normativa alemana y estar holgadamente por debajo de los límites en un futuro próximo.

A causa de este problema se propone realizar y se realizó una búsqueda de nuevos materiales que pudiesen sustituir al aluminio para la misma función pero que tuviesen unas prestaciones de aislamiento térmico más convenientes.

Consecuentemente y en conexión con esta problemática se realizó la búsqueda de materiales con varios métodos, uno de ellos con el programa educacional CES EduPack Program, que es la base en el sistema de enseñanza de materiales y procesos en más de 700 universidades de todo el mundo, combinando además el software, la información sobre los materiales y constituye una herramienta apropiada para la selección de los mismos.

Los materiales buscados, además de poseer un coeficiente de conductividad térmica relativamente bajo, deberían tener otras características que reforzasen la viabilidad de la sustitución por el aluminio como:

- Coste relativamente bajo para la construcción o poco elevado.
- Posibilidades del proceso de fabricación o trabajabilidad para el material para la realización de perfiles estructurales.
- Tipo de maquinaria necesaria para la realización de los perfiles.
- Evaluación ecológica y del ciclo de vida del material, pues es importante el hecho de que el material fuera reciclable, en ese caso, la posibilidad de tener futuras funciones tras el reciclado. Además la huella ecológica debe ser menor, por el proceso de extracción, por la energía necesaria para la obtención y producción del material, transporte y posterior reciclado, teniendo en cuenta al aluminio como objeto de comparación.
- Análisis de los requisitos especiales a considerar y que tendría que tener el material en relación al diseño estructural y constructivo.

Tras la realización de la búsqueda con la metodología oportuna y el desarrollo de la investigación, se llegó a la conclusión, de que no existían muchos materiales que combinaran todos los requisitos deseados o necesarios para la sustitución. Por esta razón, se llevo a cabo, en una segunda etapa, un estudio o investigación de la viabilidad de que los materiales seleccionados (que tenían algunas restricciones o que no cumplían alguno de los requisitos) pudiesen ser el material buscado. Este trabajo inicial presentó entonces nuevas líneas de investigación como es el objeto de mejorar las propiedades o características negativas de determinados materiales que eran un impedimento para su utilización. Dentro de estas líneas, estaría la búsqueda de nuevos métodos de reciclaje para los materiales que cumplían casi todos los requisitos pero que no podían ser reciclados (hay que tener en cuenta que hay varios tipos de reciclado: reusar, reutilizar algunas de las partes, reciclar el material en la materia prima original, reciclar con pérdida gradual de las propiedades, combustión o vertedero). Otra línea de investigación importante sería la búsqueda de métodos de reducción de los costes de algunos materiales que necesitan encontrar un lugar en el mercado, puesto que algunos materiales presentan las propiedades requeridas para la función descrita, pero al mismo tiempo un alto precio. Otro campo posible a desarrollar la creación de nuevos revestimientos protectores para algunos materiales que tienen una resistencia baja en la intemperie. Otra línea podría ser la creación de nuevos materiales o la modificación de los existentes sometiéndolos a tratamientos térmicos, químicos o mecánicos. Y por último, existe la posibilidad de la investigación en composites.

A partir de las premisas anteriores se proponen tres materiales: Titanio o aleaciones de titanio, un composite de polímero y fibra de vidrio (GFRC) y composites de matriz cerámica o CMC (Ceramic matrix composite). Se analizan estos materiales para buscar sus ventajas y desventajas con respecto al Aluminio.

Estas tres propuestas presentan algunas restricciones. El titanio y sus aleaciones tienen un precio bastante elevado; el composite de polímero tiene

problemas a la hora de su reciclaje y los composites de cerámica son también muy costosos, aún bastante desconocidos y un poco frágiles.

El material menos viable de estos tres es en la actualidad son los CMC, puesto que los composites de matriz cerámica suelen tener precios muy elevados y, aunque reforzados y mucho mejores que otras cerámicas, son aún relativamente frágiles. Por tanto la selección de estos tres materiales se reduciría a dos de ellos: el titanio y el GFRC. El nanocomposite con fibra de vidrio ya ha sido estudiado dentro de un proyecto de investigación financiado por fondos del VII Programa Marco de Investigación y Desarrollo de la Unión Europea, llamado FACOMP. Y finalmente la empresa Schüco ha incluido en sus productos, perfiles de plástico reforzado con fibra de vidrio fabricados por la empresa fiberline composites<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Fiberline Composites es una empresa danesa fundada en 1979, que se dedica a producir perfiles para fachadas y otros productos de construcción.

## **2 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

### **2.1 Justificación**

En base a lo anteriormente expuesto en la introducción, el material que proponemos y sobre el que trabajaremos para la realización de este estudio es el titanio. El titanio será pues el núcleo central de esta nueva investigación.

En la introducción del presente trabajo se describen algunas de las causas y objetivos del trabajo:

La principal causa o el principal objetivo, resumiendo, es por tanto, conseguir reducir el consumo de energía bajo la actuación del uso de materiales que signifiquen una inercia térmica mejor de los materiales utilizados hasta ahora en las fachadas, en este caso sobre todo los muros cortina.

Otra causa u objetivo análogos es reducir el impacto ambiental a través de la reducción de los niveles de contaminación gracias al uso de dióxido de titanio en las fachadas, como revestimiento del titanio pero el uso de este material es parte de una futura línea de investigación y no será estudiado en profundidad en el presente trabajo si no en futuras investigaciones.

### **2.2 Objetivo principal**

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster independientemente de los revestimientos de dióxido de titanio, es el estudio del titanio como material para fachadas, con la intención de que este estudio sea complementado con los revestimientos anteriormente mencionados en futuras líneas de investigación.

## **2.3 Objetivos específicos**

### **2.3.1 Análisis del titanio como material de construcción y viabilidad del titanio para material de construcción**

El titanio es bastante caro, pero es el séptimo metal más abundante en la tierra. Su precio no se debe a la escasez, sino a que la obtención del titanio a partir del dióxido de titanio mediante el proceso de Kroll (utilizado comúnmente hasta ahora) es muy caro y requiere mucha energía. Actualmente hay procesos como el proceso FCC CAMBRIDGE, que lo hacen más barato y asequible. Además de disminuir el precio, el cambio del proceso de extracción podría reducir el impacto ambiental del titanio, pues tras realizar un análisis del ciclo de vida del producto, se llegó a la conclusión de que su extracción y la producción lo hacen poco sostenible ecológicamente hablando. Por esta razón el objeto de este estudio consistirá en investigar sobre la viabilidad de otros métodos de obtención de este material y buscar una posibilidad de bajar su precio y su impacto ecológico encontrando un nuevo proceso de extracción. Impulsando el proceso de FCC por ejemplo.

El aluminio fue considerado inicialmente un material de lujo, con el cual se hacían cuberterías que sólo poseía gente privilegiada. El paso del tiempo y la mejora de los procesos de obtención han facilitado su disponibilidad y la mejora de costes, haciendo que sea actualmente un material de amplio uso como elemento constructivo. Se puede prever análogo comportamiento para el titanio, su precio se podría reducir y en un futuro ser un material que se use tan asiduamente como le pasa al aluminio hoy en día.

### **2.3.2 Búsqueda de requisitos necesarios para los muros cortina**

Estos fueron los requisitos sugeridos por la empresa Schüco para su sistema de montantes y travesaños para los muros cortina. Todos estos requisitos se cumplen con el titanio y sus aleaciones.



Requisitos sugeridos por Schüco para su sistema de montantes y travesaños de los muros cortina:

- Módulo de Young > 10000 (N/mm<sup>2</sup>)
- Resistencia térmica > 0,0055 - 0,0083 (mK/W)
- Temperatura de servicio entre - 40° and 80°C
- Reciclabilidad
- Precio razonable

Como se ha descrito anteriormente el precio es el factor que se considera como una desventaja. Por esa razón el proceso FCC de Cambridge debe reducir el precio, si se sustituye por el proceso de Kroll.

### 2.3.3 Combinación del titanio con el TiO<sub>2</sub> en futuras líneas de investigación

Paralelamente se pretende estudiar la inclusión del TiO<sub>2</sub> en materiales de construcción de fachadas para aprovechar sus propiedades como catalizador para reducir la contaminación aérea que está normalmente presente en las ciudades. Esta parte del desarrollo del tema de investigación se centraría en el reciclado del Ti como material constructivo. Se puede reciclar químicamente formando compuestos de titanio, que al descomponerse darían el TiO<sub>2</sub> variedad Anatasa.

Actualmente este producto se utiliza en construcción soportado sobre hormigones porosos -conocidos como hormigones para fachadas autolimpiables-, en los que el TiO<sub>2</sub> mediante procesos fotocatalíticos, con luz y oxígeno del aire, rebaja los niveles de contaminación en la ciudad.

Existen empresas constructoras como Acciona, que realizan proyectos de I+D+i que estudian el uso de este compuesto.

En el presente trabajo de tesis, se pretende, además de estudiar el reciclado de Ti como material estructural, dirigir el análisis del titanio como material de construcción para desarrollar en futuras líneas de investigación diferentes métodos de síntesis y recubrimiento superficial de  $\text{TiO}_2$ , variedad anatasa, soportada sobre Ti metálico. Uno de estos métodos sería similar al proceso de anodizado en medio ácido del aluminio (Anodizing Aluminum, J. Chem. Edu., 1979, 56, 268), como método barato y rápido.

Los resultados que se pretenden conseguir serían las conclusiones del estudio de la viabilidad de la introducción de nuevos materiales a base de titanio para la construcción, en especial para fachadas.

Se pretende aprovechar las propiedades del titanio y además del  $\text{TiO}_2$ , como revestimiento de éste (estudios sobre este revestimiento y sus propiedades se realizarán después de este Trabajo Fin de Máster). Y por tanto estudiar la posibilidad de unir los dos para obtener un producto que tenga ambas ventajas. Inicialmente y debido a los comienzos de esta investigación se pretende su uso para la estructura de muros cortina, pero también para otro tipo de fachadas. Se pretende entonces desarrollar métodos de síntesis y recubrimiento superficial de  $\text{TiO}_2$ , variedad anatasa, sobre Ti metálico.

¿Podemos imaginar el Guggenheim con su superficie coloreada –oxidada–, descontaminando la ría de Bilbao? Pues esto podría ser el resultado final de esta investigación y también los resultados que se pretenden conseguir con los experimentos y metodologías explicados en este trabajo.

Se podría llegar a disponer de un material o productos que sean autolimpiables y ecológicos, que además cumplen su primaria función estructural.

### **3 ANÁLISIS DEL TITANIO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN**

En este capítulo de introducción se repasarán las posibilidades del titanio como material de construcción. Concretamente se describirán sus propiedades y paralelamente las ventajas y desventajas de la sustitución de otros materiales por el titanio en las fachadas. Primordialmente se analiza el titanio como material para los elementos o perfiles estructurales de los muros cortina.

#### **3.1 Aleaciones de titanio**

El titanio puro no se utiliza normalmente en construcción según la base de datos de materiales CES de la universidad de Cambridge. Sin embargo las aleaciones de titanio sí han sido utilizadas. A continuación se muestra una breve descripción sobre las aleaciones del titanio y una lista de sus propiedades para tener una idea sobre la incorporación de éste material dentro de los elementos de algunos tipos de fachadas:

Las aleaciones de titanio son caras, pues el proceso de reducción para su obtención necesita ser en el vacío, para que no reaccione con otras partículas del aire. Pero son fuertes, ligeros y resistentes a la corrosión por eso pueden ser implantados en el cuerpo humano para reparar huesos. Muy comúnmente las aleaciones son con aluminio o con vanadio (Ti con 8% Al 6%V, o simplemente Ti - 6 - 4) para darle al material la capacidad de ser forjado y trabajado. Las aleaciones de titanio tienen una ductilidad limitada. Las láminas no pueden ser fácilmente dobladas hasta un radio menor de 1.5 veces su espesor. Pueden ser soldados pero con dificultad, pero se pueden unir fácilmente por difusión. El titanio se usa mucho en diseño industrial. Las carcasas de móvil y de portátiles están hechas de titanio, pues los polímeros no son lo suficientemente estables y resistentes. La resistencia y la baja densidad

del titanio lo hace, a pesar de su coste una sustitución muy atractiva a muchas necesidades. Entre ellas el aluminio usado en los muros cortina.

Hay cuatro grupos de aleaciones de titanio: aleaciones alfa, aleaciones cercanas a alfa, aleaciones alfa-beta, y aleaciones beta. Estas diferencias se basan en las diferentes fases del titanio. Las aleaciones alfa tienen una estructura con sistema cristalino hexagonal. Las beta son de estructura cúbica. Las aleaciones alfa se prefieren para aplicaciones donde hay grandes temperaturas por su resistencia a la fluencia y también para aplicaciones criogénicas por su dureza a bajas temperaturas.

Un sistema de denominación con lógica para ser simplificado presenta las cantidades de los aditivos principales de la aleación. Por ejemplo 'Ti-8-1-1' contiene un 8% aluminio, 1% molibdeno y 1% vanadio; y 'Ti-6-4' significa 6% aluminio and 4% vanadio.



Fig. 1 Se ha usado titanio en el revestimiento de algunos edificios como el Guggenheim-Bilbao, en España, del arquitecto Frank O. Gehry, [2]

### 3.2 Propiedades del titanio

#### Composición

Ti + elementos de aleación, ej. Al, Zr, Mo, Si, Sn, Ni, Fe, V

#### Propiedades generales

Densidad	4.4e3	-	4.8e3	kg/m <sup>3</sup>
Precio	* 40.6	-	44.7	EUR/kg

Este material puede ser fabricado en diferentes formatos:

A granel

En láminas

Puede ser usado para sistemas constructivos, para estructuras, en interiores, para instalaciones o para revestimientos.

#### Propiedades mecánicas

Modulo de Young	90	-	120	GPa
Módulo cortante	32	-	51	GPa
Coeficiente de Poisson	0.35	-	0.37	
Límite elástico	250	-	1.25e3	MPa
Resistencia a tracción	300	-	1.63e3	MPa
Resistencia a compresión	130	-	1.4e3	MPa
Resistencia a flexión	* 250	-	1.25e3	MPa
Deformación	1	-	40	% fuerza
Dureza - Vickers	60	-	380	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	* 146	-	405	MPa
Resistencia a la fractura	14	-	120	MPa.m <sup>0.5</sup>

### Propiedades térmico y de combustión

¿Conductor térmico o aislante?	Conductor pobre
Resistencia térmica	0.0833 - 0.2 m.°C/W
Coeficiente de expansión térmica	7.9 - 11 $\mu$ strain/°C
Calor específico	520 - 600 J/kg.°C
Punto de fusión	1.48e3 - 1.68e3 °C
Temperatura máxima de servicio	297 - 697 °C
Flamabilidad	No inflamable
Emisividad	0.12

### Propiedades higrotérmicas

Absorción de agua	0 %
Permeabilidad al vapor de agua	0 kg/s.m.Pa
Permeabilidad al aire	0 kg/s.m.Pa
Resistencia a las heladas	Muy buena

### Propiedades eléctricas

Conductor o aislante eléctrico?	Buen conductor
Resistencia eléctrica	41.7 - 202 $\mu$ ohm.cm

### Propiedades ópticas

Color natural	Gris pardusco
Transparencia	Opaco
Transmisividad	0 %

### Propiedades acústicas

Absorción acústica	Pobre
Aislamiento acústico	Bueno

Procesabilidad (escala 1 = impracticable a 5 = excelente)

Colado	3		
Formado	2	-	4
Maquinabilidad	1	-	3
Soldadura	4	-	5

Durabilidad

Agua (dulce)	Excelente
Agua (salada)	Excelente
Ácidos débiles	Excelente
Ácidos fuertes	Aceptable
Álcalis débiles	Excelente
Álcalis fuertes	Aceptable
Disolventes orgánicos	Excelente
UV radiación (luz solar)	Excelente
Resistencia al desgaste	Uso limitado
Atmósfera Industrial	Excelente
Atmósfera rural	Excelente
Atmósfera marina	Excelente

Producción primaria del material: energía y CO<sub>2</sub>

Energía englobada en la producción primaria	600	-	740	MJ/kg
Huella de CO <sub>2</sub> en la producción primaria	38	-	44	kg/kg
Procesado del material: energía				
Energía colado	* 4.5	-	5.45	MJ/kg
Energía para la forja	* 3.77	-	4.56	MJ/kg
Energía para pulvimetalurgia	* 15	-	18.2	MJ/kg
Energía de vaporización	* 27.7	-	33.5	MJ/kg
Energía maquinaria convencional (por Wt)	* 10.7	-	12.9	MJ/kg

Energía maquinaria no convencional (por Wt )	*	51.9	-	62.8	MJ/kg
--	---	------	---	------	-------

#### Procesado material: Huella CO<sub>2</sub>

CO <sub>2</sub> colado	*	0.27	-	0.327	kg/kg
CO <sub>2</sub> forjado	*	0.301	-	0.365	kg/kg
CO <sub>2</sub> pulvimetalurgia	*	1.2	-	1.45	kg/kg
CO <sub>2</sub> Vaporización	*	2.21	-	2.68	kg/kg
Energía maquinaria convencional CO2 (por Wt)	*	0.856	-	1.04	kg/kg
Energía maquinaria no convencional CO2 (por Wt)*		4.15	-	5.02	kg/kg

#### Reciclado: energía, CO<sub>2</sub> y fracción de reciclado

Recycle	Sí				
Energía englobada en el reciclado		228	-	281	MJ/kg
Huella CO <sub>2</sub> en el reciclado	*	14.4	-	16.7	kg/kg
Fracción de reciclado actual		20	-	24	%
Downcycle	Sí				
Combustión para energía	No				
Vertedero	Sí				
Biodegradable	No				
¿Un recurso renovable?	No				

No hay garantía para los datos que están marcados con un asterisco, solo son estimaciones.\*

### **3.2.1 Punto de fusión**

[2] El titanio es el tercer miembro del trío de aleaciones ligeras junto al aluminio y el magnesio, pero su precio es de más de diez veces el del éste. A pesar de esto el uso del titanio está creciendo impulsado por sus propiedades destacables. Tiene un punto de fusión muy alto (1660 C), lo que lo hace muy resistente al fuego y no pierde sus propiedades mecánicas.



En la siguiente gráfica se puede ver la diferencia del titanio con otros materiales de construcción en relación con el punto de fusión.

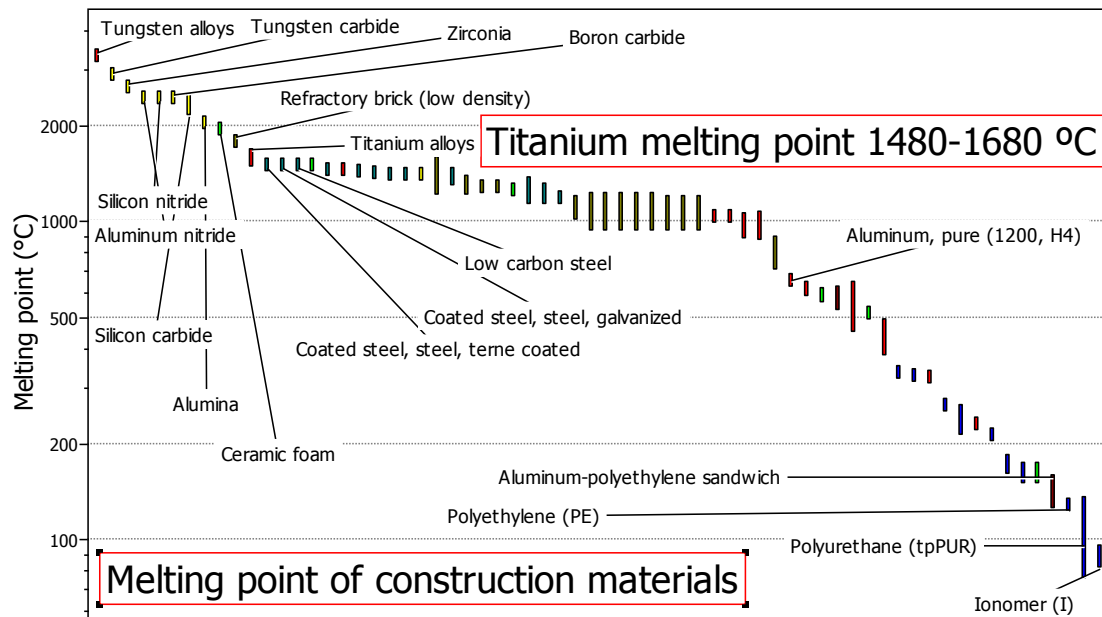


Fig. 2 Tabla representativa de los puntos de fusión de algunos materiales de construcción en comparación con las aleaciones de titanio realizada con el programa de selección y base de datos de CES de la universidad de Cambridge.

El titanio es ligero y aunque reactivo, es muy resistente a la corrosión ya que con solo una fina capa de óxido en su superficie (además esta capa no sólo tendría propiedades protectoras, si no que una capa de dióxido de titanio añadiría más ventajas al titanio, ya explicadas en este trabajo) los procesos de oxidación quedan parados.

### 3.2.2 Densidad, resistencia y dureza

Un punto muy importante a destacar es que el titanio presenta una resistencia y dureza excepcional en relación con su peso. La siguiente gráfica muestra la relación peso/ resistencia para algunos materiales de construcción.

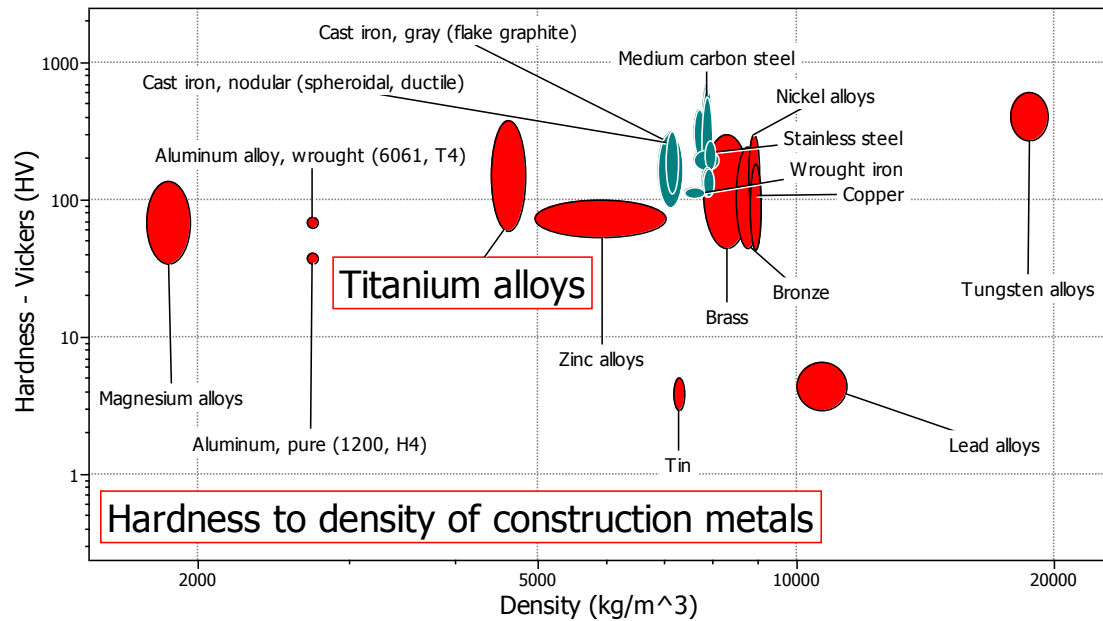


Fig 3. Gráfica sobre la relación densidad contra dureza para distintos metales usados en la construcción.

Como comparativa, en la siguiente gráfica se muestran los únicos metales que son más ligeros o que tienen más dureza que las aleaciones de titanio:

Metales más ligeros que el titanio: Aleaciones de aluminio, aluminio puro y aleaciones de magnesio.

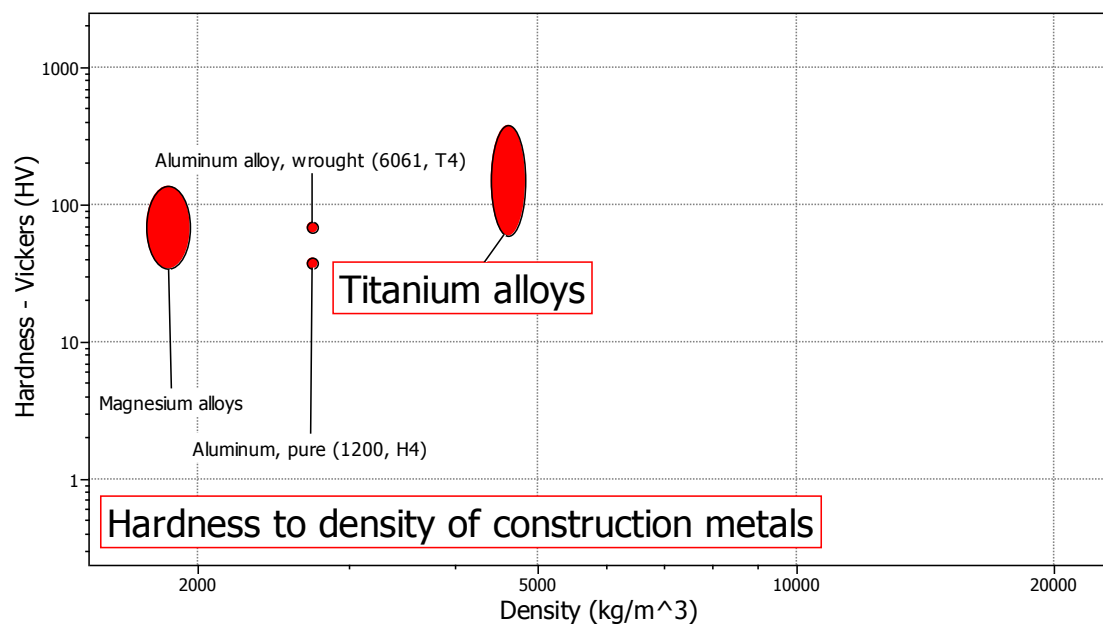


Fig. 4 Metales utilizados en construcción que son más ligeros que el titanio.

Metales que tienen más dureza que el titanio: aleaciones de tungsteno, hierro colado, y acero con baja, media y alta cantidad de carbono.

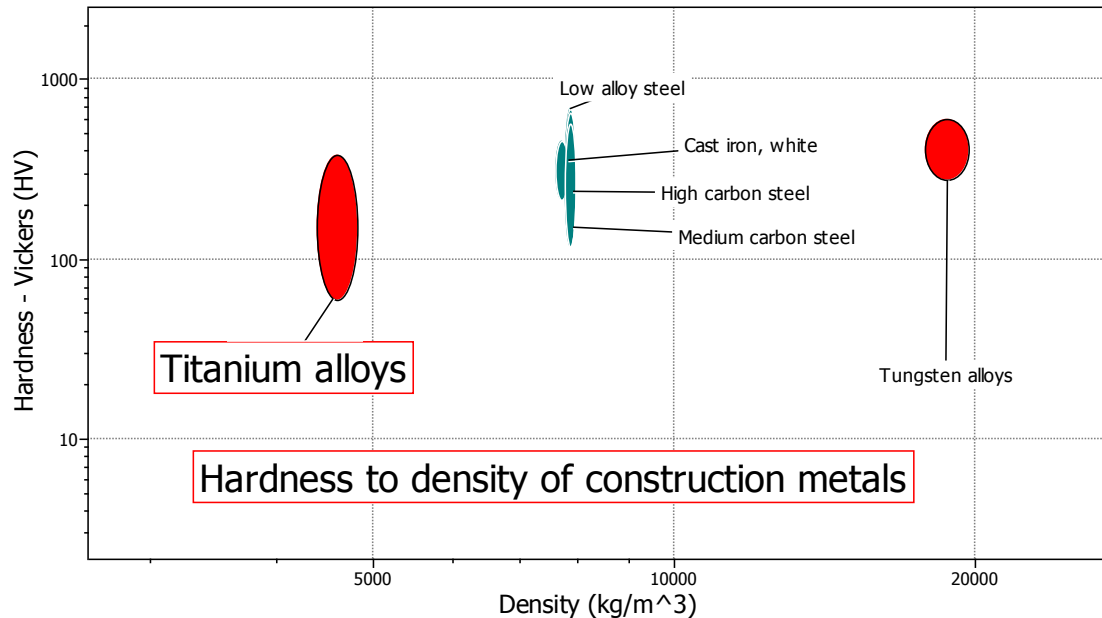


Fig. 5 Metales que tienen una dureza mayor que el titanio.

### 3.2.3 Conductividad

Una característica importante es que puede ser usado hasta temperaturas de 500 °C. Por esta razón se usa como material para las hélices de las turbinas de aviones. El titanio y sus aleaciones tienen una conductividad eléctrica alta y sus coeficientes de expansión térmica son bajos (también importante para los muros cortina pues serían necesarios menos selladores). Además una característica muy importante para esta investigación del titanio es que presenta al mismo tiempo una conductividad térmica baja. En la siguiente gráfica se muestra una comparativa de esta propiedad para diferentes metales y aleaciones. En ella se puede ver claramente que el titanio es el metal, de los usados en construcción, que presenta la más alta resistividad térmica debido a su bajo coeficiente de conductividad térmica. Por esta razón es tan interesante para la sustitución del aluminio usado actualmente para la estructura de los muros cortinas. El aluminio tiene un coeficiente de conductividad térmica hasta

50 veces más alto que el titanio, lo que significa que presenta unas pérdidas térmicas por conducción también 50 veces mayores.

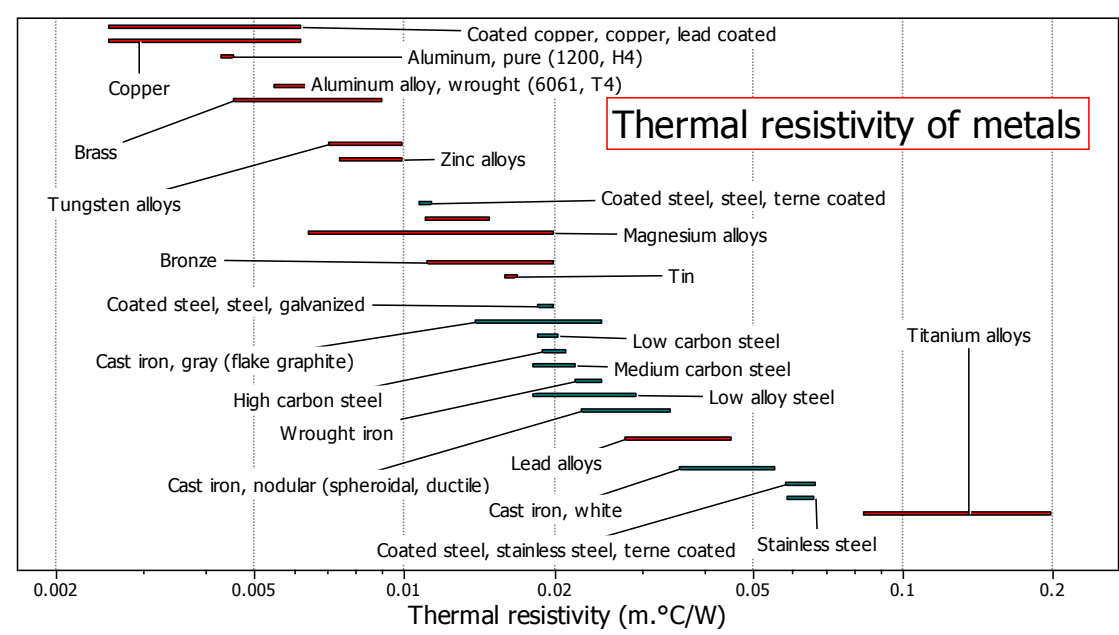


Fig. 6 Metales y su resistividad térmica en relación con el titanio.

Tras varios estudios realizados para comparar las propiedades, que serán también mostrados en capítulos posteriores en la presente investigación, se llega a la conclusión de que el precio del titanio es prácticamente la única desventaja frente al aluminio. Por esta razón se muestra en la siguiente tabla un desglose de los diferentes tipos de titanio y aleaciones y sus precios. Como se puede ver en la tabla los precios oscilan entre 25 y 65 euros por kg.

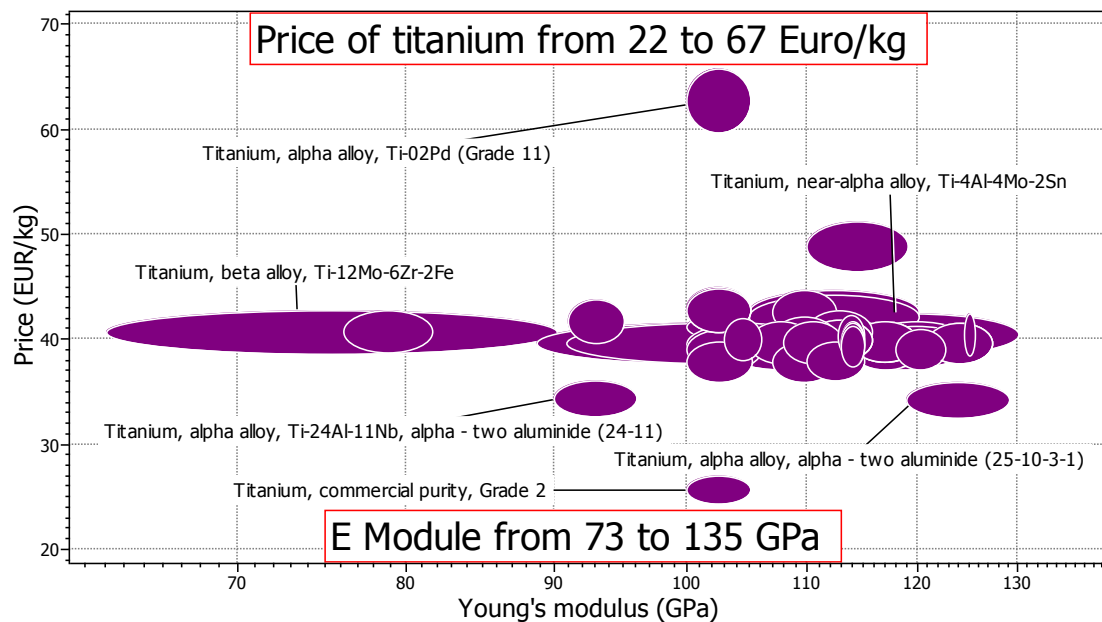


Fig. 7 Tabla representativa de los precios del titanio y sus aleaciones en el eje vertical y el Modulo de elasticidad en el eje horizontal realizado con el programa CES de selección de materiales de la universidad de Cambridge.

Otra de las desventajas del titanio es el ciclo de vida. Este va conjunto con el precio pues la principal causa es la necesidad de energía para su producción y esta a su vez es la causa de su precio.

En los siguientes datos se puede ver un resumen del análisis del ciclo de vida realizado con el programa CES de la universidad de Cambridge.

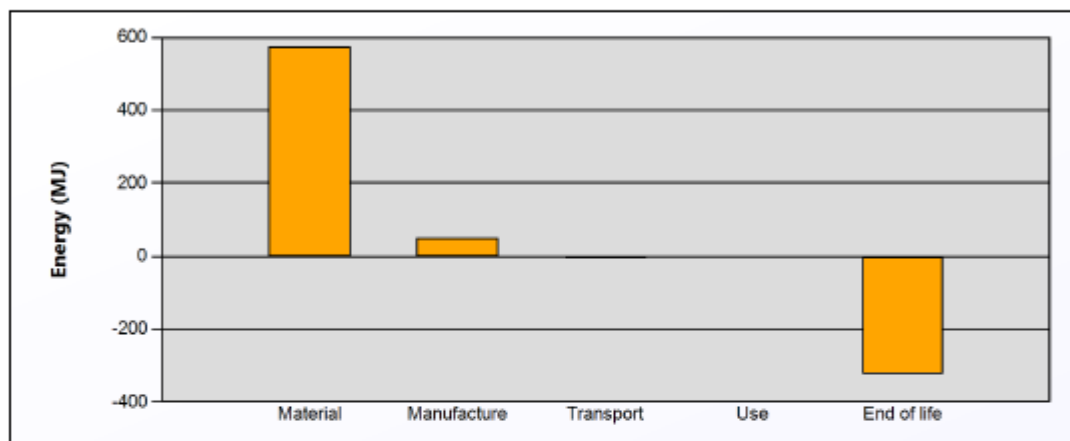
Los usos más comunes de las aleaciones del titanio en el presente son: Hélices de las turbinas de avión; aplicaciones generales aeroespaciales; ingeniería química; intercambiadores de calor; ingeniería bioquímica y médica; tanques de misiles; etc.

Product Name

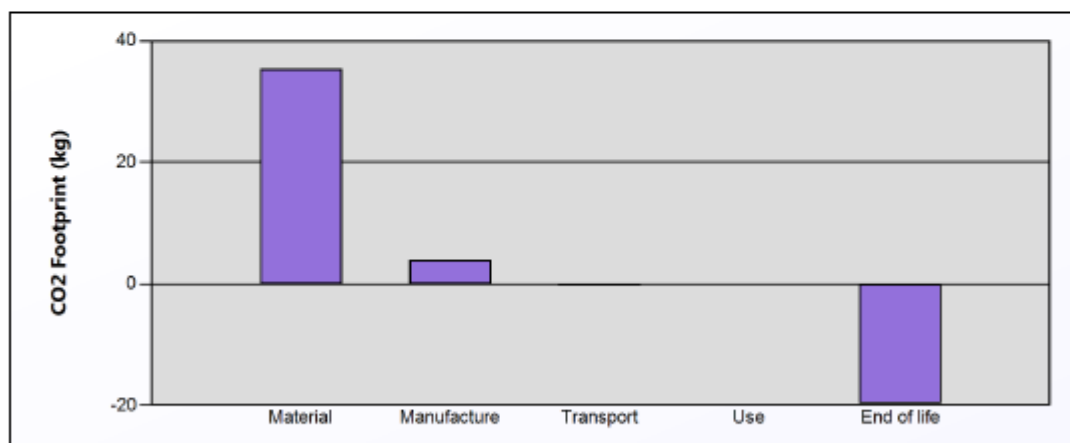
Product Life (years)

10

## Energy and CO2 Footprint Summary:



[Energy Details...](#)



[CO2 Details...](#)

Phase	Energy (MJ)	Energy (%)	CO2 (kg)	CO2 (%)
Material	576	189.3	35.3	180.3
Manufacture	50.2	16.5	4.02	20.5
Transport	0.046	0.0	0.00327	0.0
Use	0	0.0	0	0.0
End of life	-322	-105.8	-19.8	-100.8
Total	304	100	19.6	100

Fig. 8 Análisis del ciclo de vida del titanio

### **3.3 Aplicación de elementos de titanio en fachadas**

En la introducción de este trabajo se explica que el factor más importante que debe tener en cuenta en el material que sustituya al aluminio en los montantes y travesaños de los muros cortina, es el coeficiente de conductividad térmica. Este factor es el causante de la necesidad de encontrar otros materiales sustitutorios, pues el coeficiente de conductividad térmica del aluminio es un impedimento en la construcción de muros cortina. Se analizarán a continuación varios tipos de fachadas en los que el titanio podría ser aplicado, y se descartan en los que no sería necesario teniendo en cuenta las mejoras en cuestión de inercia térmica.

#### **3.3.1 Fachadas con revestimientos metálicos o con paneles sándwich de aluminio**

En general en las fachadas con revestimientos continuos de metal, no condiciona la inercia térmica el tipo de metal que se use, como en el ejemplo del museo de Guggenheim-Bilbao, en España, del arquitecto Frank O. Gehry. Esto es debido a que el revestimiento no es el único material que aparece en la fachada si no que detrás del revestimiento aparece generalmente otro material que suele ser aislamiento térmico.

En algunos casos el material que se usa es un material compuesto o composite en el que en la parte interior se puede encontrar algún material aislante y generalmente el recubrimiento es de algún metal o polímero. Un ejemplo de esto es el panel sándwich de aluminio-polietileno. [2] Es un material composite que normalmente consiste en dos láminas de aluminio (de espesor entre 0.3 - 1.0 mm) que encierran un núcleo termoplástico de polietileno, espuma de polietileno, poliestireno o polipropileno (de espesor aproximado de 3.0 mm). El panel combina la durabilidad y la resistencia del aluminio con la baja densidad y flexibilidad del núcleo, y además tiene una resistencia térmica importante:

### Propiedades generales

Densidad	* 1.37e3 - 1.4e3	kg/m <sup>3</sup>
Precio	* 15.6 - 19.9	EUR/kg

### Propiedades térmicas

¿Conductor térmico o aislante?	Buen aislante
Resistencia térmica	* 1.73 - 1.86 m.°C/W

Algunas marcas de este producto son: Alcubeond; Architecks; Alutile; Alucolor o Etalbond. En la siguiente figura se muestra un fachada hecha con este composite.



Fig. 9 Dubai Airport Exhibition Centre, con paneles composite de aluminio, 1999. Arquitecto: Dar Al-Handasah Shair & Partners, Dubai.[2]

Como se puede ver en las propiedades térmicas de este composite, la resistencia térmica es bastante buena y el precio es más barato que el titanio. Por tanto en este tipo de revestimiento no sería necesaria la sustitución del aluminio por el titanio.



### 3.3.2 Muros cortina

El tipo de fachadas en las que se propone una mejora con la sustitución del aluminio por el titanio son la de muros cortina. A continuación se muestran los requisitos más importantes que tienen que tener los materiales que se usen en los elementos estructurales de los muros cortina en relación al diseño estructural y constructivo. De esta forma se puede comprobar que los requisitos descritos y dados por la empresa de muros cortina en los objetivos para los muros cortina se cumplen con el titanio y sus aleaciones.

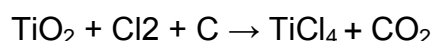
- Módulo de Young  $> 10000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
- Resistencia térmica  $> 0,0055 - 0,0083 \text{ (mK/W)}$
- Temperatura de servicio entre  $- 40^\circ$  and  $80^\circ\text{C}$
- Reciclabilidad
- Precio razonable

## 4 DEFINICIONES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### Proceso de Kroll

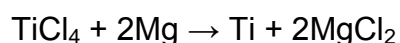
La obtención del titanio se realiza común o mayoritariamente a través del proceso de Kroll. El proceso de Kroll (16) consiste o consta de los siguientes pasos:

1 - Obtención de tetracloruro de titanio a partir de la cloración a 800°C, en presencia de carbón, mediante la reacción:



2 - Se purifica el tetracloruro de titanio mediante destilación fraccionada.

3 - Se reduce el  $\text{TiCl}_4$  con magnesio o sodio molido en una atmósfera inerte (esto es importante), con la reacción:



4 - El titanio forma una esponja en la pared del reactor, la cual se purifica por lixiviación con ácido clorhídrico diluido. El  $\text{MgCl}_2$  se recicla electrolíticamente.

5 - Se compacta la esponja resultante. También se puede reducir el  $\text{TiCl}_4$  mediante sodio en lugar de magnesio, entonces la esponja resultante es granular y esto facilita el proceso de compactación.

6 - Se funde la esponja en un horno con un crisol de cobre refrigerado, mediante un arco eléctrico de electrodo consumible en una atmósfera inerte. Este paso sería ya el último, pero en ocasiones se desea mejorar la pureza y homogeneidad del lingote por lo que se repetiría este.

Este proceso es caro, pues hay que hacerlo por lotes, es intensivo en mano de obra y bastante lento. Y se logran solo pocas toneladas de titanio al

final del proceso, puesto que la producción masiva se ve imposibilitada por algunas limitaciones.

Otro método se basa en la purificación del titanio mediante descomposición con yodo y se usa básicamente para la obtención de titanio que posea una muy alta pureza para investigación u otras funciones.

### **Proceso FCC Cambridge**

Otro método creado posteriormente y recientemente para la obtención del titanio es el método de FCC Cambridge. Exactamente entre 1996 y 1997 por George Z. Chen, Derek J. Fray y Tom W. Farthing. Se llama FCC pues corresponde a las iniciales de los apellidos de éstos. Se piensa que con este método es posible producir el titanio más eficientemente que con el método Kroll.

Este método es electroquímico y consiste en lo siguiente:

Los óxidos son reducidos catódicamente para conseguir el titanio o aleaciones en sales en fase líquida. Normalmente el proceso se realiza a una temperatura entre 900°C y 1100°C, con un ánodo (normalmente carbón) y un cátodo (el óxido) y el electrolito es  $\text{CaCl}_2$ . El cátodo se polariza con un voltaje aplicado entre el cátodo y el ánodo. Entonces el óxido suelta iones de oxígeno en el  $\text{CaCl}_2$  creándose  $\text{CaO}$ . Y además también se unen al ánodo creando  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ .

Se considera como un nuevo concepto para producir esponja de titanio (22). En un artículo de Katsutoshi Ono y Ryosuke O. Suzuki, se explica este método detalladamente.

# A New Concept for Producing Ti Sponge: Calciothermic Reduction

Katsutoshi Ono and Ryosuke O. Suzuki

*This article presents a new cell concept for the calciothermic reduction of titanium dioxide and an ongoing test program for its experimental verification. The thermochemical background of this concept is focused and a new cell design is described. This system consists of a single cell, where both the reduction reaction and the electrolytic reaction for recovery of reducing agent coexist in the same molten calcium-chloride bath. The theoretical electric energy requirement for this cell is about half of that for the magnesium electrolytic cell in the Kroll process.*

## INTRODUCTION

A new processing system for sponge titanium production is continuous, energy-saving, and entirely different from the conventional Kroll route. In this process, titanium is produced through a calciothermic reaction with titanium-dioxide powder, which is available from many sources worldwide. Calcium is dissolved with a strong reducing power in fused  $\text{CaCl}_2$ , which constitutes the media.  $\text{TiO}_2$  powder is directly top-charged into this media and reduced. Sufficiently deoxidized titanium metal deposits agglomerate rapidly, form granular sponge, and sink to the bottom of the cell.

The reducing agent is recovered in-situ by electrolysis. Since the process is continuous, the molten salt contains the reduction byproduct  $\text{CaO}$  in solution. The  $\text{CaO}$  can be decomposed through the simultaneous electrolysis in-situ between a consumable carbon anode and an iron cathode, creating both calcium liquid and calcium dissolved in the  $\text{CaCl}_2$  melt, accompanied with  $\text{CO}_2$  evolution at the anode.

Previous attempts to reduce  $\text{TiO}_2$  with calcium were made by Ruff and

Brintzinger in 1923 and W.J. Kroll in 1937 using fused calcium-chloride flux. The proposal described in this paper—a single cell for titanium extraction—is based on the promising results of work that has been performed in laboratory scale at Kyoto University for more than 15 years. Those studies have focused on the thermodynamic properties of the titanium-oxygen system at high temperatures,<sup>1-3</sup> the calciothermic reduction of titanium dioxide,<sup>4-7</sup> the deoxidation of titanium by calcium-halide flux,<sup>8-10</sup> and the electrochemical deoxidation of titanium.<sup>11,12</sup> The direct reduction of  $\text{TiO}_2$  and deoxidation of titanium using an electrolytic process in fused  $\text{CaCl}_2$  has also been the subject of research by several authors. In 1967, Oki and Inoue<sup>13</sup> converted directly cathodic  $\text{TiO}_2$  powder into titanium metal using a fused  $\text{CaCl}_2$  electrolyte and a carbon anode. However, they did not achieve sufficient purity. Okabe et al.<sup>11,12</sup> succeeded in deoxidizing titanium cathode to an extra-low oxygen level, less than 10 ppm, in a fused  $\text{CaCl}_2$  electrolyte employing also a carbon

anode. More recently, Chen et al.<sup>14</sup> carried out the direct electrochemical reduction of  $\text{TiO}_2$  to titanium metal in molten  $\text{CaCl}_2$ . Despite a low current efficiency, their process, which was named the Fray-Farthing-Chen (FFC) Cambridge Process, has been reported as successful at a laboratory scale and is currently being scaled up.<sup>15</sup> Among the benefits of  $\text{CaCl}_2$  are its lack of toxicity, easy dissolution into water, and cheap cost, as reviewed recently in *JOM* October 2001.<sup>15</sup>

## REDUCING POWER OF MOLTEN SALT

The calcium ion in stoichiometric  $\text{CaCl}_2$  is normally  $\text{Ca}^{2+}$ . It has been recognized that some amounts of calcium dissolve in fused  $\text{CaCl}_2$ .<sup>7-12,16</sup> Such a melt is no longer stoichiometric, but an equilibrium mixture of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  ions and free electrons.<sup>16</sup> Because it exceeds the solubility limit of  $\text{Ca}^+$  ion, pure liquid calcium precipitates and its activity is then unity. Therefore, the molten  $\text{CaCl}_2$  melt saturated with calcium has a strong reducing power

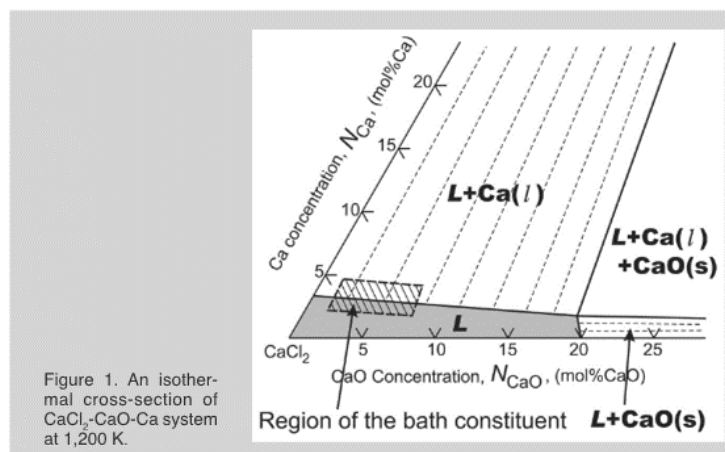


Figure 1. An isothermal cross-section of  $\text{CaCl}_2$ - $\text{CaO}$ - $\text{Ca}$  system at 1,200 K.

## **Catálisis**

La catálisis es el proceso por el cual se aumenta o disminuye la velocidad de una reacción química. Los catalizadores pueden actuar de dos formas. La primera formando un compuesto intermedio y la segunda, absorción.

## **Fotocatalisis**

Según la real academia de la lengua la fotocátalisis es el aumento de la velocidad de una reacción química por efecto de la luz o de otras formas de energía radiante.

Uno de los materiales que soportan la fotocátalisis es el dióxido de Titanio. El  $\text{TiO}_2$  en forma de polvo ultrafino con predominio de la fase anatasa, es el material más comúnmente usado en las plantas de tratamiento de aguas y también es el precursor usual en la preparación de catalizadores soportados para el tratamiento de aire (1).

## **Rutilo**

El rutilo es un mineral que pertenece a la clase de los óxidos, concretamente es un óxido de titanio y su fórmula química es  $\text{TiO}_2$ . Se presenta con colores azulado, violeta, rojo sangre, rojo pardo o amarillo parduzco según el hierro que contenga. Su punto de fusión es muy alto (2.378,2 K) y en ebullición se descompone a sesquióxido de titanio, base para colorantes azules automotrices, de joyería artificial, pues es el color del zafiro. Su red cristalina es tetragonal distorsionada. Presenta un módulo de tensión de 4,1 TPa/cm<sup>2</sup> lo que lo hace útil en cortadores de vidrio.

En 1951 se utilizó como sustituto del diamante y actualmente se utiliza en gemas de fantasía. Su aspecto puede ser transparente o translúcido. El sistema cristalino es tetragonal y su hábito cristalino es con cristales de más de 3 mm, prismas cortos, acicular, capilar, granular, estriado, masivo o maclas. Su

fractura concoidea a desigual y la dureza de 6 -6,5 en la escala de Mohs. La densidad es de 4,25 g/cm<sup>3</sup>.

El rutilo es un mineral del grupo IV (óxidos), según la clasificación de Strunz. Se le halla en los yacimientos de zafiro. Los países que producen este mineral son Rusia, India y algunos países de Sudamérica. La Antártida tiene también yacimientos.

Es muy importante en la industria, pues es la base del titanio metálico y el pigmento del óxido de titanio (IV) amorfo, el pigmento blanco más importante del mundo. Además se utiliza en tecnología láser para crear los láser titanio-zafiro. También a partir de este se puede obtener el yoduro de titanio (IV), uno de los mejores catalizadores de polímeros de enlaces etéricos. Igualmente se emplea en soldadura para la elaboración de electrodos con material de aportación generalmente de acero al carbono, como recubrimiento y protección de dicho material base.

El rutilo presenta gran resistencia al ataque químico. Sólo lo atacan el ácido fluorhídrico (HF) y el ácido sulfúrico concentrado en caliente. Es poco atacado por el agua regia. Por esta razón se utiliza para producir pigmentos tanto de recubrimientos automotrices como en alimentos. Se disuelve en hidróxidos de metales alcalinos produciendo titanatos insolubles en agua.

## **Anatasa**

La anatasa es un mineral, perteneciente a los óxidos. Y en concreto es un óxido de titanio. Sus colores son Marrón, añil, negro, verdoso, lila claro o gris.

Puede ser transparente o translúcido y su sistema cristalino es Tetragonal - Ditetragonal Dipiramidal. Su fractura es sub-concoidea. Su dureza es de 5,5 a 6 en la escala de Mohs y su densidad de 3,9 g/cm<sup>2</sup>. La anatasa es una de las cinco formas minerales del óxido de titanio (IV) o dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>).

Es insoluble en ácidos, por lo que se puede limpiar con ácidos diluidos. Es infusible y cuando se calienta por encima de 915 °C, la anatasa se transforma en rutilo lo que conlleva un aumento de su densidad.

La pirámide habitual de la anatasa, paralela a las caras que tienen exfoliación perfecta, presenta un ángulo sobre el borde polar de  $82^{\circ}9'$ , mucho mayor que el correspondiente ángulo del rutilo ( $56^{\circ}52\frac{1}{2}'$ ). La anatasa no es tan dura y es menos densa que el rutilo, y su brillo es más adamantino.

La anatasa presenta dos tipos de hábitos cristalinos. El más común consiste en dobles pirámides agudas simples de color añil y brillo acerado. El segundo tipo se caracteriza por la existencia de numerosas caras piramidales, soliendo ser más planas y a veces prismáticas; en este caso la coloración va desde el amarillo miel hasta el marrón.

Por lo general la anatasa es un mineral secundario, proveniente de otros minerales portadores de titanio. Se puede encontrar en filones alpinos, en rocas ígneas y metamórficas, así como en pegmatitas

En el laboratorio se pueden preparar cristales de anatasa mediante procesos sol-gel. Como ejemplos de éstos, cabe citar la hidrólisis controlada de tetracloruro de titanio ( $\text{TiCl}_4$ ) o de alcóxidos de titanio. Estas anatasas sintéticas son de interés considerable para la fotocatalisis y para celdas solares Graetzel dentro de la energía fotovoltaica.

### **Proceso sol-gel**

El proceso sol gel (13) es una ruta química que permite fabricar materiales amorfos y policristalinos de forma relativamente sencilla. Se pueden obtener nuevos materiales que por los métodos tradicionales de fabricación son muy difíciles de obtener, tales como combinaciones de óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ , etc.).

## 5 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se muestran los antecedentes del uso de titanio en la construcción y más concretamente en las fachadas. Se muestran también los antecedentes en revestimientos que soporta el titanio y que se han usado con alguna determinada función.

### 5.1 Antecedentes históricos

Los usos más comunes de las aleaciones del titanio en el presente son:

Hélices de las turbinas de avión; aplicaciones generales aeroespaciales; ingeniería química; intercambiadores de calor; ingeniería bioquímica y médica; tanques de misiles; etc. Pero también han sido utilizadas las aleaciones de titanio en algunos elementos constructivos.

A continuación se dará un repaso a algunas de las aplicaciones del titanio y en concreto en la construcción:

En la tesis doctoral de José León Paniagua Caparrón: "Estructuras ligeras. Campo de aplicación de los nuevos materiales estructurales dentro del diseño arquitectónico" de 1982, podemos encontrar ya al titanio como material para estructuras ligeras.

"(...). En cuanto a su resistencia específica, el titanio (sus aleaciones) es el mejor material metálico. Además, las aleaciones de titanio poseen una excelente resistencia a la corrosión comparada con la de otros materiales metálicos" <sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Miburn, D.A. y Chi, M. "Investigación sobre los cables de titanio para usos marinos" Journal of the Structural Division, Vol. 102, nºST11.



En la citada tesis se puede encontrar que en ese año la utilización del titanio en construcción se reducía a la forma de cables, y surgía como alternativa a los cables de acero, que ante ciertos ambientes desfavorables (especialmente los salinos), no respondían excesivamente bien. Algo que con el titanio se solucionaba por su resistencia a la corrosión. Además la resistencia a la fatiga también es mayor en el titanio, siendo también, la relación tensión/peso específico más favorable para las aleaciones de titanio.

Algunas de las ventajas descritas en la tesis son:

- a. Altas resistencias
- b. Buena resistencia a la fatiga
- c. Excelente resistencia ante la corrosión
- d. Bajo peso específico
- e. No magnético
- f. Abundancia

También se manifiesta la idea de que el titanio, al ser abundante, lograría una explotación asegurada y creciente en el próximo futuro. Y afirma nuevamente (al igual que la hipótesis base del presente trabajo), que sería de esperar que el uso de este material estructural, con características muy específicas y únicas, se extendiera cuando los costes de su transformación se abaratasen.

En la dirección de Internet (15) se puede encontrar un artículo sobre la utilización del titanio en la construcción. Este está resumido en las siguientes líneas. ¿Cuál es el papel que desempeña el titanio en la construcción?

El titanio posee propiedades mecánicas parecidas al acero, tanto puro como en las aleaciones que forma, por tanto compite con el acero en muchas aplicaciones técnicas, especialmente con el acero inoxidable. El titanio fue declarado material estratégico por parte de Estados Unidos durante muchos años. Desde la primera aplicación, cuando el arquitecto Frank O. Gehry utilizó el material en la construcción del Museo Guggenheim, se ha convertido en un material muy interesante para muchos arquitectos. El titanio dura mucho. El material se utiliza en todo el mundo, por ejemplo para la construcción del Museo de Arte de Denver y la Ópera de Pekín.

En el 2004 se terminó de construir en Kronberg, cerca de Fráncfort del Meno, el primer edificio con una fachada completa de titanio en Alemania. El material fue provisto por la empresa Deutsche Titan, una filial de ThyssenKrupp. Deutsche Titan opera una fábrica de titanio en Europa y apuesta desde entonces por el mercado en crecimiento de la arquitectura.

Han sido además contruidos ya varios edificios con titanio. A continuación se muestran y describen algunos de estos.

a) Guggenheim Bilbao

Este museo fue inaugurado en 1997 en Bilbao y entonces fue toda una innovación y polémica en España el uso de planchas de titanio para su fachada. Pero desde su construcción se viene hablando mucho sobre este material en la construcción, que hasta entonces prácticamente se usaba en la aeronáutica, ya que su costo era elevado. El arquitecto decidió usar el titanio sin embargo, por razones de diseño.

En este caso concreto se trata de una aleación de zinc y titanio, pero con un alto contenido de éste último. Se trata de una chapa cuyo espesor es de un tercio de milímetro y resulta muy manejable. Al ser tan fino, se adapta además perfectamente a la curva descrita por el edificio. Y por supuesto su peso y precio es de este modo mucho más económico.

Tras 14 años de su construcción han sido realizadas algunas fotos<sup>3</sup> de la fachada del titanio en el museo Guggenheim en Bilbao en la actualidad y en la figura 11 se muestra una de ellas.

---

<sup>3</sup> Estas fotos fueron realizadas por Pascual Tarín, autor de las publicaciones [4] y [5].



Fig. 11 Foto de la fachada de titanio del Guggenheim en Bilbao

En ella se pueden ver principios de corrosión en el metal. Esto no se debe a la corrosión del titanio, pues es altamente resistente a esta. Pero, sin embargo, el problema del titanio es que si encuentra cerca de la presencia de otros materiales, principalmente metales, acelera de forma considerable la corrosión de estos. Es un hecho que ocurre como con el aluminio, pero que, desgraciadamente es aún más probable con el titanio. Por esta razón es importante no usar otro tipo de metales en las estructuras o elementos realizados en titanio. El hecho de que una construcción, por ejemplo un barco, sea completamente realizada en titanio es muy importante. Afortunadamente en los muros cortinas aparecen materiales como el vidrio y polímeros con los que no ocurriría esto. Y como además los diseños de la actualidad se hacen

pensando en el aluminio (que también evita otros metales como el acero), entonces no sería un problema tan importante para este estudio o trabajo.

*(23) Apenas tres años después de su inauguración, la imagen prístina del museo Guggenheim en Bilbao se está manchando, literalmente, por manchas marrones en la superficie de titanio. (Jue, 11 Ene 2001)*

En este artículo (23) se trata sobre la problemática de algunas manchas que han aparecido sobre el titanio de la fachada del Guggenheim similares a las mostradas en la anterior figura. Según el arquitecto Gehry, estas manchas son la causa de que un sellador de sílice se derramara sobre algunos paneles de titanio y que el contratista permitiera esto. Gehry apuntó que la fachada se debería de haber limpiado tras su finalización. Pero esto no ocurrió.

El museo Solomon R. Guggenheim anunció un proyecto para construir un nuevo museo de Manhattan de \$678 millones de dólares que sería igualmente diseñado por Gehry y que también tendría este tipo de fachada. Pero a raíz de estas manchas surgió la duda sobre este material, que es bastante desconocido en la construcción arquitectónica.

Titanium Metals Corporation, o Timet es la compañía de Denver y es el proveedor de las hojas de titanio en Bilbao. Esta empresa insiste en que el titanio es absolutamente inmune a contaminación urbana, ambientes marinos, los compuestos de sulfuro de áreas industriales y es a prueba de ambientes aún más agresivos. Por tanto el problema no tendría nada que ver con el material en cuestión.

José Ignacio Vidarte, el director general del Guggenheim Bilbao, cree que la mancha se crea por aire contaminado, específicamente por partículas de sílice, que se fijan al titanio.

Gary Nemchock, consultor de Timet en arquitectura, analizó las manchas tres meses antes de la apertura del museo y se encontró una película del óxido que cubría el titanio con aluminio, potasio, calcio y sílice. La película del óxido se genera naturalmente en el titanio en el momento en que se expone al oxígeno contenido en el aire. Y además apuntó que las manchas estaban allí desde 1994, y que no eran la consecuencia del deterioro del titanio en el tiempo.

Esta consultora desarrolló un método para poder limpiar las manchas, pero a Gehry no le pareció bien pues alteraba el aspecto visual del titanio.

El museo recurrió entonces a la Fundación Inasmet, un instituto de investigación no lucrativo sobre los metales y los minerales, situado en las proximidades de San Sebastián. Su equipo confirmó que la mancha no se generó en el titanio sino en la transparente película de óxido, concretamente apuntan que se generó por las partículas de sílice y por el efecto corrosivo de la humedad en la ciudad de Bilbao. Además sostienen que el sílice pudo haberse caído de la piedra caliza cortada in situ, o también de la atmósfera.

Finalmente esta fundación desarrolla un producto que puede aplicarse sobre el titanio para limpiarlo de forma sencilla y barata.

b) Edificio con la fachada completamente de titanio en Kronberg (Alemania)

Este edificio fue diseñado por los arquitectos RHWL de Londres. Asimismo los paneles son de la empresa para fachadas y cubiertas de metal “lummel”.



Fig. 12 Foto de la fachada de titanio del edificio en Kronberg (Alemania)  
([http://www.lummel.de/en/lummel\\_deu01.htm](http://www.lummel.de/en/lummel_deu01.htm))

c) Bodega Marqués de Riscal

Nuevamente el arquitecto O. Gehry realiza un proyecto con fachada de titanio para las bodegas del Marqués de Riscal, que son las bodegas más antiguas y tradicionales de la Rioja.



Fig. 13 Foto de la fachada de titanio del edificio de las bodegas del Marqués de Riscal (<http://jonartola.wordpress.com/category/uncategorized/>)

d) Museo de Arte en Denver

En esta ocasión se trata de un proyecto en conjunto entre Daniel Liebskind y la sociedad Davis de Denver.



Fig. 14 Foto de la fachada de titanio del edificio del museo de arte de Denver  
(<http://www.taringa.net/posts/info/1142814.R/Casa-en-forma-de-Inodoro.html>)

e) Gran Teatro nacional de Beijing

Este edificio fue proyectado por arquitecto parisino Paul Andreu y la mitad de su fachada fue realizada con titanio.



Fig. 15 Foto de la fachada de titanio del edificio del gran teatro nacional de Peking



f) Centro de ciencia, Glasgow, sala de exposiciones y cine Imax

En este edificio la estructura del centro también fue realizado en titanio.



Fig. 16 Foto de la fachada de titanio del centro de ciencia en Glasgow

g) MTRC Estación Central, Hong Kong

En este edificio también está construida la fachada por la empresa para fachadas y cubiertas de metal “lummel”. En ella se emplea titanio puro de 0.6 mm de espesor.

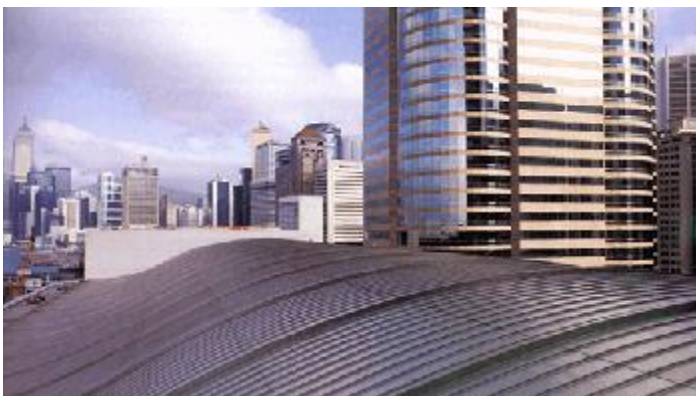


Fig. 17 Foto de la fachada de titanio en Estación Central, Hong Kong

## 5.2 Estudios actuales

### 5.2.1 Sobre el titanio y sus aleaciones

En este capítulo se realiza una recapitulación sobre los procesos industriales que se llevan a cabo para la inclusión del titanio y sus aleaciones en el ámbito de la edificación.

#### Procesos de extracción

Existen, a parte del proceso de Kroll se estudian o han probado otros procesos de obtención del titanio que pretenden reducir la dificultad y el coste de este método. Estos métodos son los siguientes:

- Electrolisis de  $\text{Cl}_4\text{Ti}$ . Existen plantas industriales que están en prueba.
- Electrolisis de fluorotitanatos.
- Electrólisis de óxidos:
  1. Método Cambridge, válido con  $\text{TiO}_2$  muy puro. El cátodo es el  $\text{TiO}_2$  y el ánodo es carbono. El electrolito sería  $\text{Cl}_2\text{Ca}$ , a  $900^\circ\text{C}$ .
  2. Método JTS: Reducción de  $\text{Cl}_4\text{Ti}$  con Ca en reactor.

#### Otros avances en las aleaciones del titanio

El titanio [4] es el metal de más corta historia y sin embargo se le vienen aplicando muchos logros en la ciencia de los materiales, tanto en metalurgia como en procesos de fabricación en general. Alguno de estos procesos se refiere a tratamientos térmicos como el temple, el bonificado, etc. Con esto se han ido mejorando las prestaciones de las aleaciones existentes, se han desarrollado otras nuevas, se ha conseguido una disminución del precio (por esta razón se puede esperar una disminución aún mayor) y, como

consecuencia se ha posibilitado su aplicación en diferentes campos de la ingeniería o de la ciencia distintos de los iniciales y se ha ampliado también la aplicación en éstos.

En este momento se está asistiendo a un redescubrimiento de las aleaciones de tipo  $\beta$  con altas resistencia, con buena combinación de otras propiedades mecánicas y buen comportamiento en procesos metalúrgicos (características muy importantes para la obtención de perfiles para muros cortina).

Se está intentando elevar el módulo elástico efectivo de estas aleaciones aprovechando su dependencia de la orientación de la red hexagonal y su tendencia a adquirir textura. Elevar el módulo elástico del titanio para su uso en muros cortina no es en principio un requisito importante, puesto que el módulo inicial del titanio está muy por encima de los requisitos propuestos. Pero indirectamente puede ser positivo por dos razones:

- Se podría reducir el espesor de los perfiles aún más (sin perder propiedades mecánicas) y así reducir el precio. Además, para justificar que es posible realizar perfiles que tengan un espesor muy pequeño, se muestra a continuación una foto de una estructura en zigzag que se usa en los aviones y que posee una resistencia muy alta con menos de 1 mm.
- También se podría reducir el peso de la estructura aún más reduciendo el espesor.

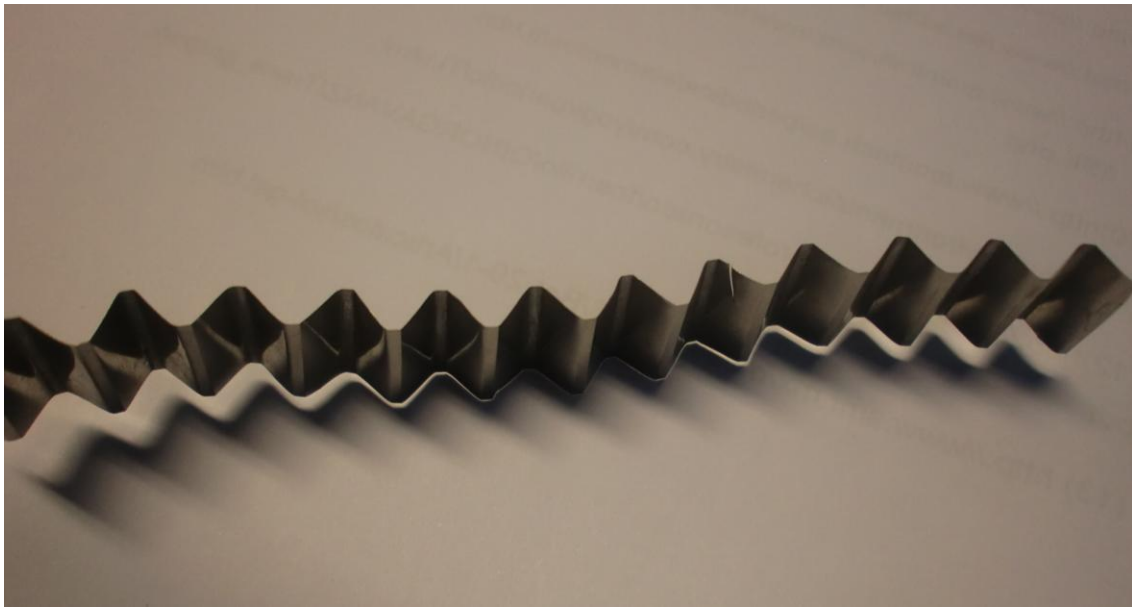


Fig. 18 Foto de titanio con estructura en zigzag

Este aumento del módulo elástico parece conseguirse en chapas que han sufrido procesos muy controlados de deformación, pero no se consigue todavía en otras formas, como piezas forjadas o moldeadas, ni siquiera utilizando técnicas de recristalización o solidificación direccional.

El estudio en los últimos años de aspectos como la microestructura, temperatura y velocidad de deformación, que controlan el comportamiento superelástico (SPD), posibilitan la utilización de aleaciones del tipo Ti-6Al-4V y de otras del tipo súper  $\alpha$  en las que, deformadas a 900 °C, se consiguen alargamientos de hasta el 1000 % sin deformación de cavidades. Actualmente, se están intentando conseguir estas mismas propiedades en las aleaciones de tipo  $\beta$ .

Estas aleaciones ofrecen ventajas para su soldadura por difusión (DB). La combinación de esta técnica con la superplasticidad (SP-FDB) permite obtener estructuras complejas, tales como la de panel de abeja mostrada en la figura 18 u otras similares, que se consiguen inyectando gas entre chapas previamente soldadas por puntos o linealmente. Con este sistema se consiguen ahorros de hasta el 50 % en el coste de fabricación con respecto a estructuras similares remachadas, eliminando, además, los problemas de fatiga en el entorno de los remaches.

La utilización de técnicas avanzadas de fusión de aleaciones con haz de electrones o con plasma, junto a diversas técnicas de moldeo recientes, permiten rebajar el coste de las piezas. Su calidad se mejora mediante

compresión isostática en caliente (HIP), o incluso, en frío (CHIP), mejorando el comportamiento mecánico, sobre todo en fatiga.

En la actualidad, se usa la forja isotérmica para mejorar la homogeneidad de estas aleaciones como el control de su microestructura y dimensiones. La igualdad de temperaturas entre matriz (de aleaciones de molibdeno) y pieza, unida a las bajas velocidades de deformación que evitan el calentamiento adiabático, reduce las cargas a aplicar hasta la décima parte y facilita la, a veces difícil, forjabilidad de las aleaciones de titanio y el control de las propiedades obtenidas que dependen mucho de los procesos termomecánicos.

En pulvimetalurgia, se trabaja aumentando la pureza del polvo prealeado (PA), el afino de grano de polvo y la combinación de esta técnica con la HIP o con la CHIP, obteniéndose piezas con un comportamiento mecánico, incluso en fatiga, comparable al de las piezas obtenidas por metalurgia convencional de lingote moldeado. Con una aleación Ti-8V-5Fe-1Al se han alcanzado resistencias de hasta 1400 MPa, con un 10% de alargamiento.

Las técnicas de solidificación rápida (RSP) y sintetización posterior están permitiendo la obtención de aleaciones con gran tendencia a la segregación o con alto contenido de elementos dispersoides, que es imposible obtener por moldeo convencional. Con procesos de atomización con electrodo rotativo (REP), con disco rotatorio o por depósito con plasma (RSPD), se consiguen aleaciones homogéneas con altos contenidos metaloides (carbono, boro, silicio y galio), o la retención en solución de elementos que precipitarían en otros procesos. En etapas posteriores de precipitarán de forma dispersa y adecuada. La adición de tierras raras (Ce, Y y Er) produce una dispersión ultrafina de sus óxidos que eleva la resistencia. El erbio es un elemento que, además, contribuye al afino de grano en la solidificación primaria.

La solidificación rápida se aplica, también, para obtener aleaciones con altos contenidos de aluminio que produce altos contenidos de fase  $\alpha$ -2 y para el desarrollo de aleaciones resistentes a alta temperatura, comúnmente superiores a 700 °C. Esto las hace competitivas con las superaleaciones de base níquel, en las que se aprovecha también el efecto endurecedor de la precipitación de esa misma fase  $\alpha$ -2, llegándose a citar su posible uso a 1000°C. Estas aleaciones se pueden usar como matriz de materiales compuestos de matriz metálica (MMC), con fibras de carburos de silicio o de titanio o con diboruros de titanio, que pueden obtenerse con el procedimiento convencional de añadir la fibra y mezclarla mecánicamente, o por el proceso

XD de generarla (o generar dispersoides) en la propia aleación que es la matriz.

La utilización a alta temperatura ( $> 600^{\circ}\text{C}$ ) plantea problemas de oxidación que no se resuelven fácilmente, exigiendo la aplicación de recubrimientos superficiales. Ha sido empleada la implantación iónica de volframio o de metales nobles.

Por implantación iónica se realizan también procesos de nitruración, en los que se consiguen capas de fases con amplia zona de difusión y microdurezas superficiales de hasta 2000 HV.

#### Estudios sobre el titanio y su abundancia

1. J. S. Joffe and A. J. Puch (New Jersey Agricultural Experiment Station). Soil profile studies: VI. Distribution of titanium in soils with special reference to podzols. Recibido para publicación el 26 de Setiembre 1983. (Datos sobre el titanio en los suelos: el titanio es uno de los elementos más abundantes en la capa terrestre y por supuesto en los suelos. Tomando en cuenta la litosfera, el Ti es el noveno elemento en el orden de abundancia).

En este estudio se trata de analizar la corteza terrestre para verificar el alto contenido de titanio que se puede encontrar y, consecuentemente, su disponibilidad.

TABLA SOBRE LA ABUNDANCIA DE VARIOS MATERIALES [5]

Material	Aluminio	Hierro	Magnesio	Titanio	Níquel
Contenido en corteza terrestre (%)	8	6	2	0,8	0,01

### 5.2.2 Sobre el dióxido de titanio y revestimientos

En este capítulo se realiza una recapitulación sobre el uso o el estudio del uso de dióxido de titanio en procesos o materiales constructivos con el propósito de reducir los niveles de contaminación.

Bajo el nombre de “Fachadas de edificios que se limpian solas y que absorben la contaminación ambiental” han surgido recientes trabajos y artículos en los medios de comunicación. Con el paso del tiempo, las fachadas de las viviendas tienden a ensuciarse de manera inexorable, lo que supone un notable deterioro estético y un aparatoso y caro proceso de limpieza cuando el aspecto del edificio llega a ser inaceptable.

Por otra parte, la nube de contaminación que cubre amenazadoramente las grandes ciudades, no solo es significativa para el impacto ambiental, si no que supone un grave problema de salud pública al aumentar el riesgo de padecer enfermedades respiratorias.

A nivel europeo y con el objetivo de aunar en un material de construcción para las viviendas la solución a ambos problemas, se ha desarrollado recientemente un proyecto de investigación conjunto promovido por la UE. Se trata del proyecto PICADA (Photo-catalytic Innovative Coverings Applications for D-pollution Assessment).

Este nombre agrupa un consorcio europeo formado por empresas privadas, institutos de investigación y el Centro Común de Investigación (CCR) de la Comisión Europea que durante varios años ha estado desarrollando productos que lograrán cumplir esos propósitos.

El resultado más prometedor ha sido el del Tx Active. Se trata de un tipo de cemento recientemente comercializado. Uno de los experimentos realizados durante su investigación fue el de recubrir siete kilómetros de una carretera en Milán con este material. Su resultado no pudo ser más prometedor: se registró una reducción de hasta el 60% de la concentración de óxido nitroso en el nivel de calle (18).

Su capacidad para reducir los contaminantes está entre el 20 y el 80% del total, variando en función de las condiciones atmosféricas y de radiación solar. Si una ciudad se recubriera el 15% de la superficie visible con productos que contengan Tx Active, se estima que podría reducirse la contaminación a la mitad.

Este tipo de cemento ya ha sido utilizado en edificios representativos como la Basílica “Dives in Misericordia” en Roma, el “Hotel de Police” en Burdeos o la sede de Air France en el aeropuerto Roissy-Charles de Gaulle en París. Aunque sólo hay que aplicarlo en la capa más superficial de fachada, presenta sin embargo el inconveniente de su elevado precio -al menos seis veces mayor que el del cemento convencional-.

El  $\text{TiO}_2$  es un sólido blanco que presenta tres modificaciones cristalinas, rutilo, anatasa y brookita. La Anatasa es la forma estructural con actividad fotocatalítica, es insoluble en ácidos, por lo que se puede limpiar con ácidos diluidos. Es térmicamente estable y se transforma en la variedad rutilo cuando se calienta por encima de  $915^\circ\text{C}$ , lo que conlleva un aumento de su densidad hasta  $4,1 \text{ g/cm}^3$ .

1. Proyecto PICADA (Photo-catalytic Innovative Coverings Applications for D-pollution Assessment). Proyecto de investigación conjunto promovido por la UE.
2. Candal, R.J., Zeltner, W.A. and Anderson, M.A. Titanium-supported titania photoelectrodes made by sol-gel. Journal of Environmental Engineering, 1999. October 1999: p. 906-912.



3. Zaroni MV, Sene JJ, Selcuk H, Anderson MA. Photoelectrocatalytic Production of Active Chlorine on Nanocrystalline Titanium Dioxide Thin-Film Electrodes

La producción de cloro e hipocloritos es un interés económico y tecnológico debido a su uso para muchas aplicaciones comerciales. Este artículo muestra la oxidación de iones de cloruro para liberar cloro como ha sido investigado, usando dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y dióxido de titanio con varios metales (M- $\text{TiO}_2$ ). Se obtuvo cloro en un reactor de aire libre usando una capa fina de  $\text{TiO}_2$  e iluminado con luz ultravioleta. Las partes de  $\text{TiO}_2$  puro han funcionado mejor que con metales (M- $\text{TiO}_2$ ). Las soluciones de los ensayos de 0.05 mol L<sup>-1</sup> NaCl con pH entre 2.0 y 4.0 fueron las mejores para una rápida producción de cloro. Se trata de una investigación completa sobre todos los parámetros que influyen en el proceso global de producción de cloro por fotoelectrocátalisis, como son el potencial, la concentración de NaCl, el pH y el tiempo.

4. Análisis químico del pigmento dióxido de titanio. MELC-12.23. Laboratorio central de ensayo de materiales de construcción. Madrid 1964.

### 5.3 Conclusiones de los antecedentes

Las conclusiones de los antecedentes se pueden resumir así:

- El titanio al ser un material relativamente moderno o nuevo no ha tenido mucho uso y aún se realizan muchos estudios sobre el mismo.
- El titanio se ha usado ya en la construcción y en la arquitectura en bastantes edificios y además se le reconoce como un material muy interesante para muchos edificios de tipo experimental puesto que se puede formar fácilmente.
- No se han encontrado indicios del uso de titanio en la estructura de muros cortina pero sí se puede llegar a la conclusión de que funcionarían de igual o mejor modo que las de aluminio.
- El precio del titanio es una desventaja, pero se están realizando estudios actualmente para reducir su precio con la ayuda de nuevos métodos de obtención de éste a partir del mineral.
- El titanio ha sido usado en varios edificios en su fachada, en los cuales se cubre completamente toda la superficie de la parte opaca de la fachada del edificio. Consecuentemente es bastante probable que el precio de un muro cortina cuya estructura sea de titanio no supere el precio de las fachadas realizadas hasta ahora puesto que la mayor parte de superficie está constituida por acristalamiento. Y entonces el titanio sí sería competitivo con otros edificios de aluminio, puesto que además, muchos de estos edificios son singulares y el titanio es capaz de competir por su atracción estética.
- Se han encontrado estudios para la mejora de la resistencia mecánica del titanio a base de nuevos tratamiento térmicos en distintas fases del titanio. Algo que puede servir para reducir los espesores mínimos y aumentar el módulo de Young y consecuentemente reducir el precio y el material necesario.

## **6 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO**

En el capítulo 3 del presente trabajo (análisis del titanio como material de construcción) se llega a la conclusión o se expone la hipótesis de que sería interesante estudiar la viabilidad del uso del titanio sobretodo para sustituirlo por el aluminio en los muros cortina. Consecuentemente el desarrollo del presente trabajo se centrará solamente en los muros cortina.

La metodología a seguir en este estudio se basa en la de búsqueda y contraste de información analíticamente a partir de estas conclusiones parciales del capítulo 3. Por esta razón se realizaran estudios específicos de varios temas.

Existen por tanto tres partes o temas diferenciados en el presente estudio:

1. estudio sobre titanio para muros cortina;
2. comparativa del titanio con el aluminio en muros cortina y
3. análisis sobre el precio del titanio.

Estas tres partes sirven para llegar a conclusiones sobre la viabilidad de la introducción de titanio para la construcción de fachadas y concretamente en muros cortina.

Metodología a seguir:

1. Búsqueda bibliográfica y documental

Primeramente se ha llevado a cabo en el capítulo 3 esta investigación una recapitulación sobre las propiedades del titanio, para poder analizarlas y también de los sistemas constructivos en los que podría ser viable la introducción de titanio o aleaciones de titanio.

También en el capítulo 5 se realiza una compilación del uso hasta la actualidad del titanio en el campo de la construcción, específicamente en la edificación. Y además se realiza un estado del arte para conocer las líneas de investigación que se están realizando con respecto al titanio.

## 2. Análisis y comparación

En el capítulo 7 se realiza un análisis sobre la sustitución del aluminio en los muros cortina por el titanio o sus aleaciones. En este análisis se realiza una comprobación de que el titanio pueda usarse con el mismo fin que el aluminio en los muros cortina. Para esto se realiza una lista de requisitos. A continuación se realiza una comparación de todos estos requisitos entre el aluminio y el titanio. Por último se lleva a cabo un estudio analítico sobre el valor económico del titanio y su posible reducción, puesto que es uno de los factores más importantes y decisivos para la sustitución del aluminio por el titanio en los muros cortina y para la introducción del mismo en la construcción de fachadas.

## **7 DESARROLLO DEL TRABAJO**

### **7.1 Estudio sobre titanio para muros cortina**

En este estudio sobre la viabilidad de la introducción de titanio para la construcción de fachadas, se realiza un análisis de comprobación de que todos los requisitos necesarios para la introducción del titanio en las fachadas sean cumplidos. En este capítulo se realiza tal análisis para los montantes y travesaños de los muros cortina. Además para paneles que son parte de los muros cortina cuando no hay acristalamiento. Dentro de estos requisitos se engloban las propiedades básicas y más tarde la posibilidad de realizar perfiles con secciones similares a las usadas con el aluminio, que tienen una determinada forma para optimizar la eficiencia térmica de los marcos y de la fachada en conjunto.

1. Las propiedades requeridas para el material son:

- Módulo de Young  $> 10000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
- Resistencia térmica  $> 0,0055 - 0,0083 \text{ (mK/W)}$
- Temperatura de servicio entre  $- 40^\circ$  and  $80^\circ\text{C}$
- Reciclabilidad
- Precio razonable

Si repasamos las propiedades del titanio del capítulo 3 podemos encontrar que estos requisitos se cumplen a excepción del precio, sobre el que se hace un análisis en el apartado 7.3 de este capítulo. A continuación se muestra una tabla comparativa de las propiedades del titanio y de las requeridas para la sustitución por el aluminio.

<b>Propiedades</b>	<b>Requisitos</b>	<b>Aleaciones de titanio</b>
Módulo de Young	> 10000 (N/mm <sup>2</sup> )	90 - 120 GPa
Resistencia térmica	> 0,0055 - 0,0083 (mK/W)	0.0833 - 0.2 m.°C/W
Temperatura de servicio	entre - 40° and 80°C	< 297-697°C
Coeficiente de expansión térmica	Similar al del vidrio 0-15 µstrain/°C	7,9 - 11
Reciclabilidad	Sí	Sí
Precio	Razonable	*40.6 - 44.7 EUR/kg

Fig. 19 Tabla resumen de la propiedades requisito y del titanio

## 2. Formado de los perfiles:

Como se puede ver en la figura 20, los perfiles para muros cortina de la empresa Schüco poseen una sección característica que les proporciona la capacidad de tener una transmitancia ( $U_f$  = transmitancia del marco) bastante optimizada. Consecuentemente es favorable o conveniente la posibilidad de fabricar perfiles iguales o similares con el titanio. Para ello vamos a repasar y

analizar su producción y trabajabilidad con ayuda del programa CES de Cambridge y con el asesoramiento de varias empresas del sector de producción de titanio (Materion; Timet; Rembar; RTI International Metal, Inc.; A. Zahner Company; Metal Construction Association; NAAMM, etc.).

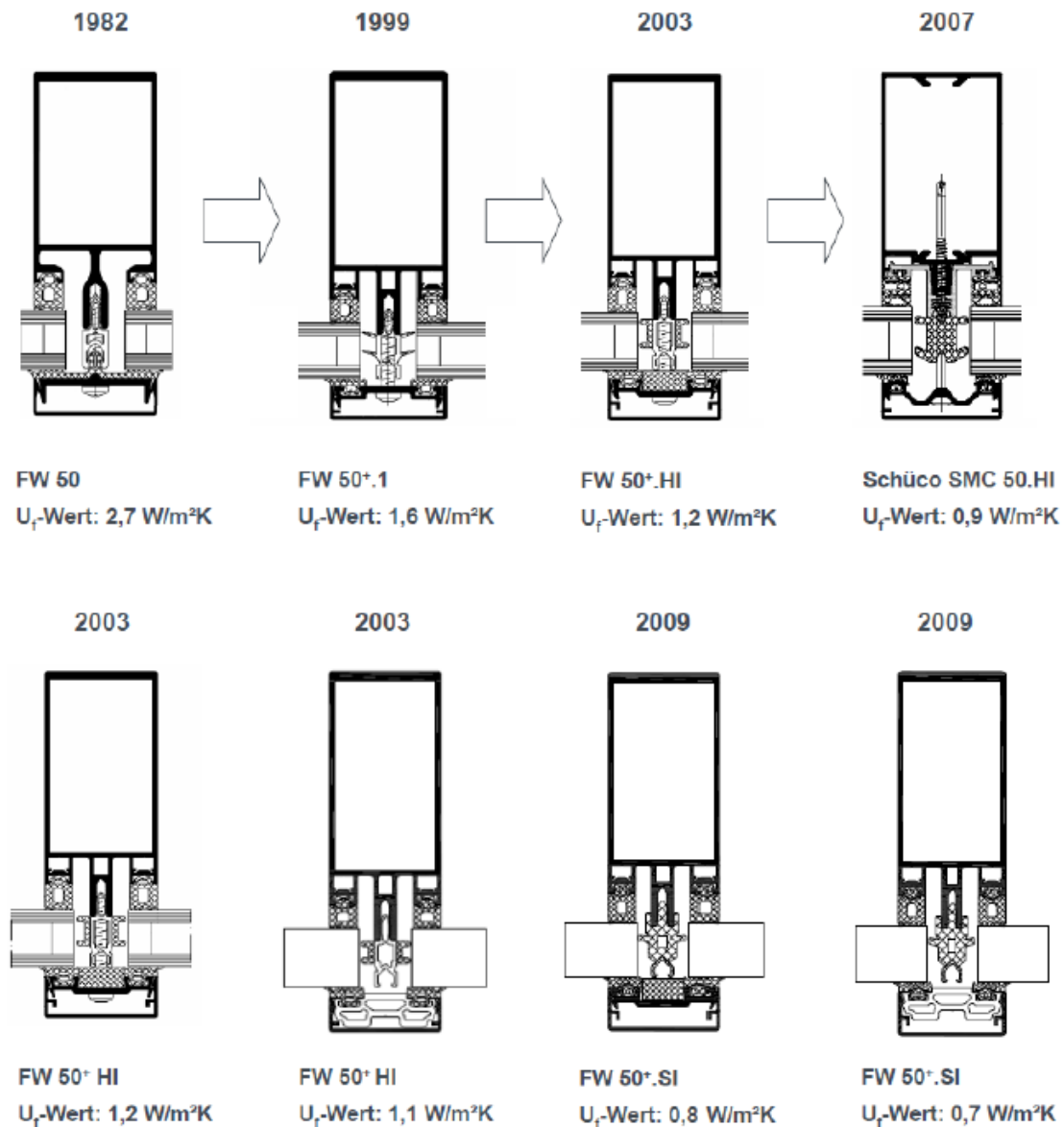


Fig. 20 Evolución de los perfiles para muros cortina de aluminio de la empresa Schüco

- Producción:

Existen varias empresas en la actualidad que producen titanio y sus aleaciones. Una de ellas es la empresa TIMET, que además tras el asesoramiento oportuno afirman que la realización de perfiles como los de la figura 21 en titanio está al alcance de sus posibilidades.

(24)El titanio ofrece una excelente combinación de propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión. Pero además su fabricación es sencilla y se pueden realizar el formado requerido. En general es mejor tener en cuenta las propiedades del titanio antes de sustituir cualquier material con este. Para su producción se han seguido las especificaciones del ASTM y la normativa de TEMA y ASME.

La producción de tubos de titanio empezó en los años 50. En sus comienzos estos tubos eran extruidos. Entonces se seguían normativas de la industria del cobre. Y también había tubos ensayados en plantas de condensadores.

Aunque estos tubos abastecían un servicio excelente, no eran competitivos en precio con los tubos de cobre o de acero inoxidable. Entonces se pensó en realizar los tubos con un espesor más pequeño. La empresa TIMET fue de los pioneros en introducir dichos tubos en el mercado.

En los últimos veinte años, el uso de tubos de titanio se ha expandido de una forma considerable. El titanio que más se comercializa es el titanio puro (99.5% Ti). Sin embargo las aleaciones se desarrollan también para obtener una resistencia a la corrosión magnífica.

En la producción de tubos de titanio se usan los lingotes. Los lingotes se funden y se convierten en una banda caliente que se enrolla. Se realizan entonces los tratamientos convenientes, y se controla el espesor en un calibre.

- Forma:

Esencialmente la forma que han de tener los componentes de los muros cortina de titanio sería la de los perfiles de los montantes y los travesaños. Posteriormente la de la chapa embellecedora. En la figura 21 se muestra la sección tipo que se estudia en esta investigación. Este tipo de perfil es uno de los utilizados por la empresa Schüco para sus muros cortina de aluminio. En este apartado se comprueba la viabilidad del formado de dichos perfiles o similares con el titanio.



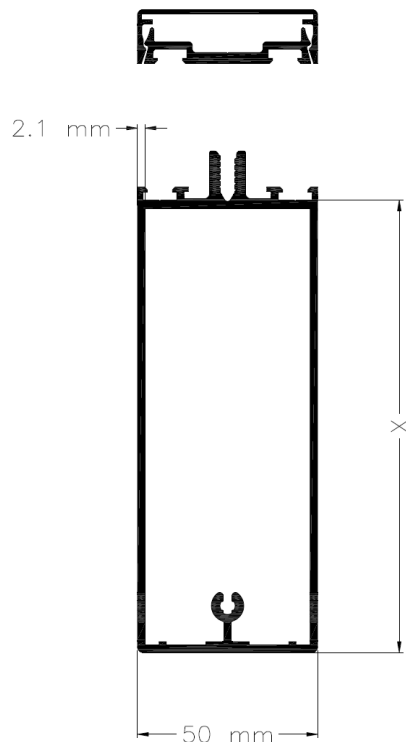


Fig. 21 Sección tipo de los perfiles para muros cortina.

Según el programa CES de Cambridge, los metales de la figura 22 son los que pueden ser extruidos, forjados o laminados. El titanio está incluido en ellos, por tanto es viable su formado.

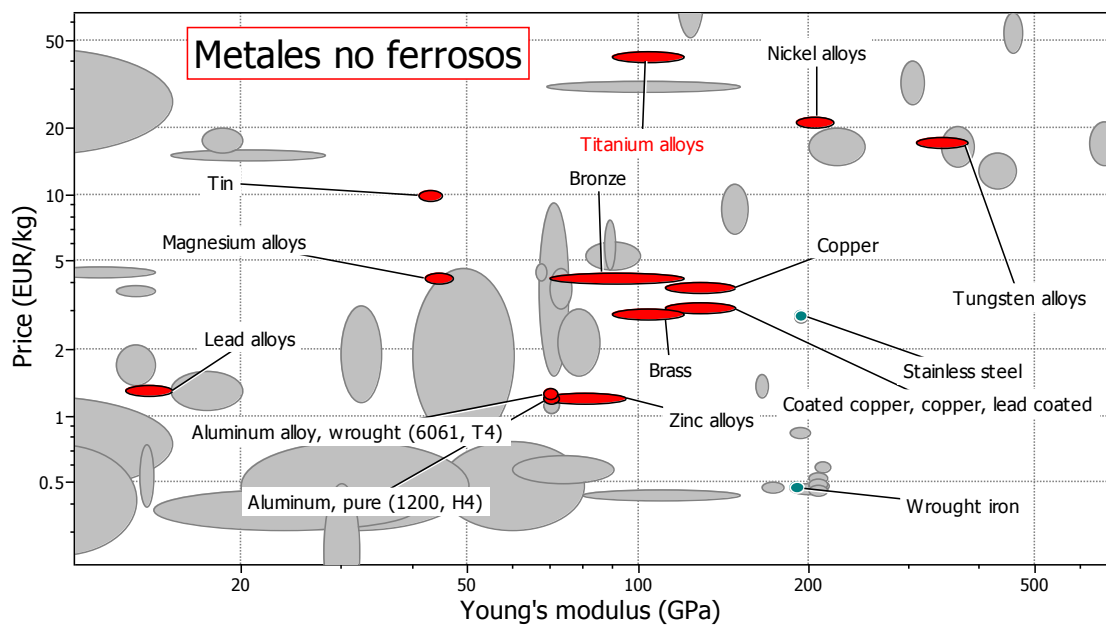


Fig. 22 Metales no ferrosos que pueden ser extruidos, forjados o laminados.

- Revestimientos: Resistencia al desgaste

En el programa CES de Cambridge también se puede encontrar que el titanio es prácticamente durable frente a muchos agentes. Sin embargo su resistencia al desgaste es delicada. Se pueden pensar en revestimientos como el PVD, que consiste en una capa de metal depositada por vapor.

### **Durability**

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Acceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Acceptable
Organic solvents	Excellent
UV radiation (sunlight)	Excellent
<b>Wear resistance</b>	<b>Limited use</b>
Industrial atmosphere	Excellent
Rural atmosphere	Excellent
Marine atmosphere	Excellent

Fig.23 Durabilidad de las aleaciones de titanio frente a diversos factores

## **7.2 Comparativa del titanio con el aluminio en muros cortina**

En este apartado se realiza un análisis comparativo entre el aluminio y el titanio en los muros cortina.

### **1. Transmitancia**

Como visto en el apartado anterior, con la solución constructiva de FW 50+. Si se consigue valor de  $U_f$  (U del montante y el travesaño) =  $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ . La comparación más importante entre el titanio y el aluminio en este estudio es precisamente la de la transmitancia. Por tanto es la primera característica que se va a comparar.

Para calcular la transmitancia en muros cortinas existe la norma europea: EN 13947:2006 *Thermal performance of curtain walling – Calculation transmittance*, y dentro de esta se encuentra que la determinación de la transmitancia del marco ( $U_f$ ) se puede obtener de varias formas:

- Con un **método experimental** en el que los perfiles son ensayados según la norma EN 12412-2, *Thermal performance of windows, doors and shutters – Determination of thermal transmittance by hot box method – Part 2: Frames*.
- En la norma EN ISO 10077-1:2006, *Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1: General (ISO 10077-1:2006)*, aparece un apéndice informativo para el cálculo de la transmitancia térmica de los marcos, que guía también a un **método numérico** reflejado en la norma EN ISO 10077-2:2003, *Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames (ISO 10077-2:2003)*.

Además existen programas informáticos que pueden calcular la transmitancia de un determinado perfil. En particular en esta investigación se realiza dicho cálculo con el programa THERM, que es un programa de cálculo de calor en 2 dimensiones en régimen estacionario por lo que resulta especialmente útil para los cálculos de los puentes térmicos, pero su origen es el cálculo de características térmicas de huecos, marcos y sistemas de acristalamiento. Se realiza dicho cálculo con el aluminio y seguidamente con el titanio para obtener la diferencia entre estas.

Estas son las condiciones, propiedades y procedimiento para el cálculo de la transmitancia con el programa THERM:

Según la norma EN ISO 10077-1:2006, los supuestos para  $R_{si}$  y el  $R_{se}$  para el cálculo de la transmitancia son:

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Para el cálculo con el programa Therm se usan también estos valores y este es el esquema de materiales y sistema constructivo para el cálculo:

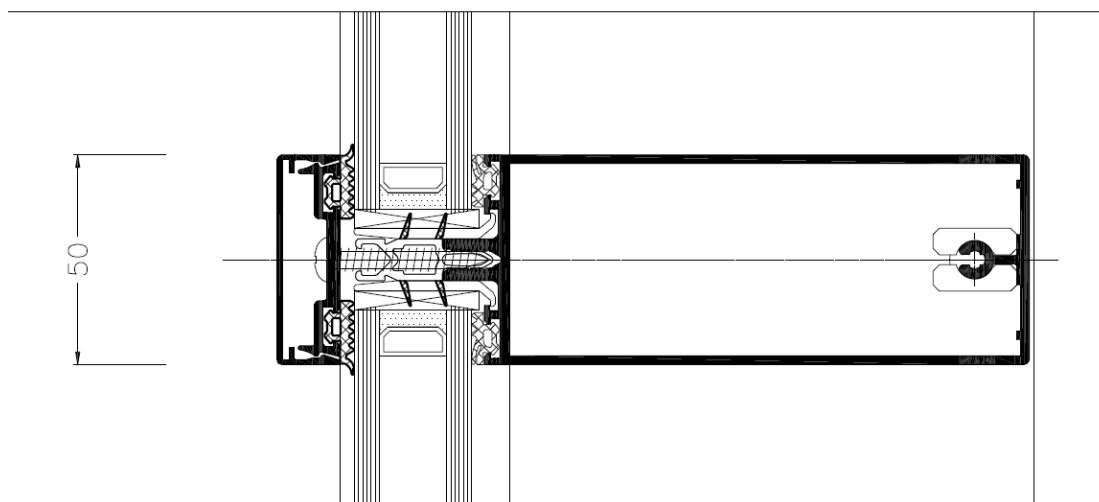



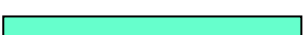



Fig. 24 Sección del muro cortina para el cálculo de  $U_f$  con THERM

A la hora de seleccionar los materiales de cálculo con el programa no se puede encontrar el titanio, entonces hay que crear un nuevo material para introducirlo en el programa. Las juntas de separación de acristalamiento con los perfiles metálicos son de caucho de etileno dieno o EPDM y tampoco aparece en el programa, por tanto hay que introducir sus propiedades. Esta es la lista de materiales que van a influenciar los resultados del cálculo:

Aluminio; Titanio; Vidrio; Cavity y Junta de EPDM

Las propiedades que se han tomado como base para el cálculo (puesto que varían entre varios valores según los datos del CES de Cambridge) con el programa THERM son las siguientes:

Propiedades	Conductividad	Emisividad	Color del modelo en THERM
Aluminio	120 W/mK	0,8	
Titanio	5 W/mK	0,12	
Vidrio	1,4 W/mK	0,9	
Cavity			
Junta de EPDM	0,14 W/mK	0,87	

Para el cálculo se debe realizar un modelo como el mostrado en la figura 25 con el programa THERM con los distintos materiales y las distintas condiciones de contorno, y posteriormente se obtienen resultados con esquemas sobre las líneas de igual temperatura, los caminos preponderantes seguidos por el calor y de simulación de temperaturas mediante escala de colores. También se obtienen resultados sobre el factor U. Esto se realiza tanto con perfiles de aluminio como de titanio, para posteriormente compararlos.

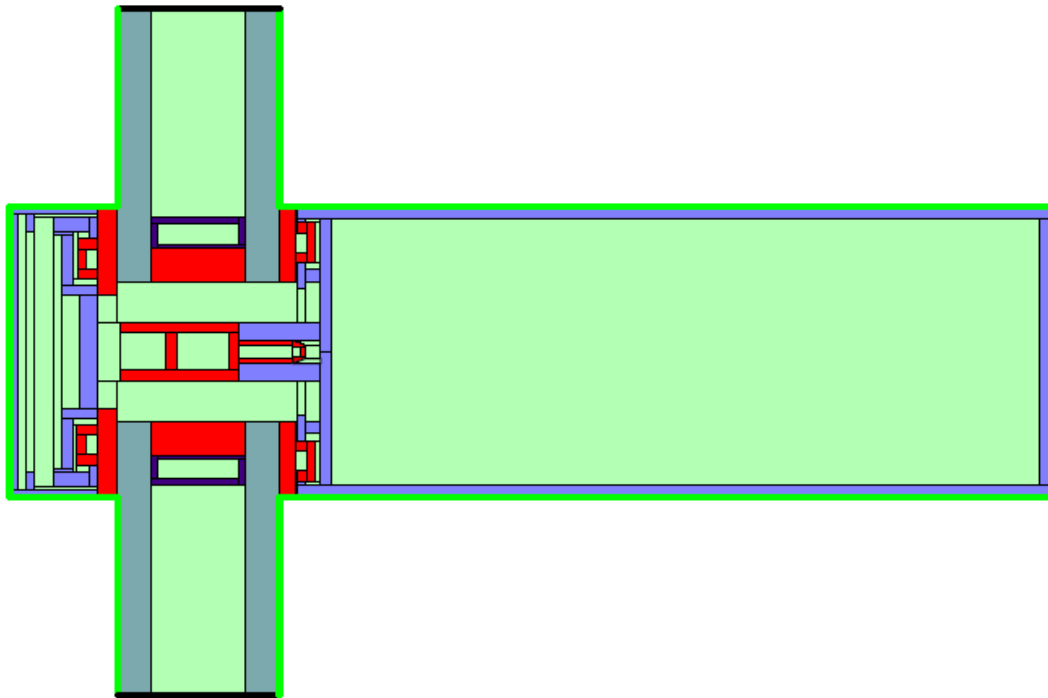


Fig. 25 Modelo realizado con THERM sobre el muro cortina para el cálculo de  $U_f$

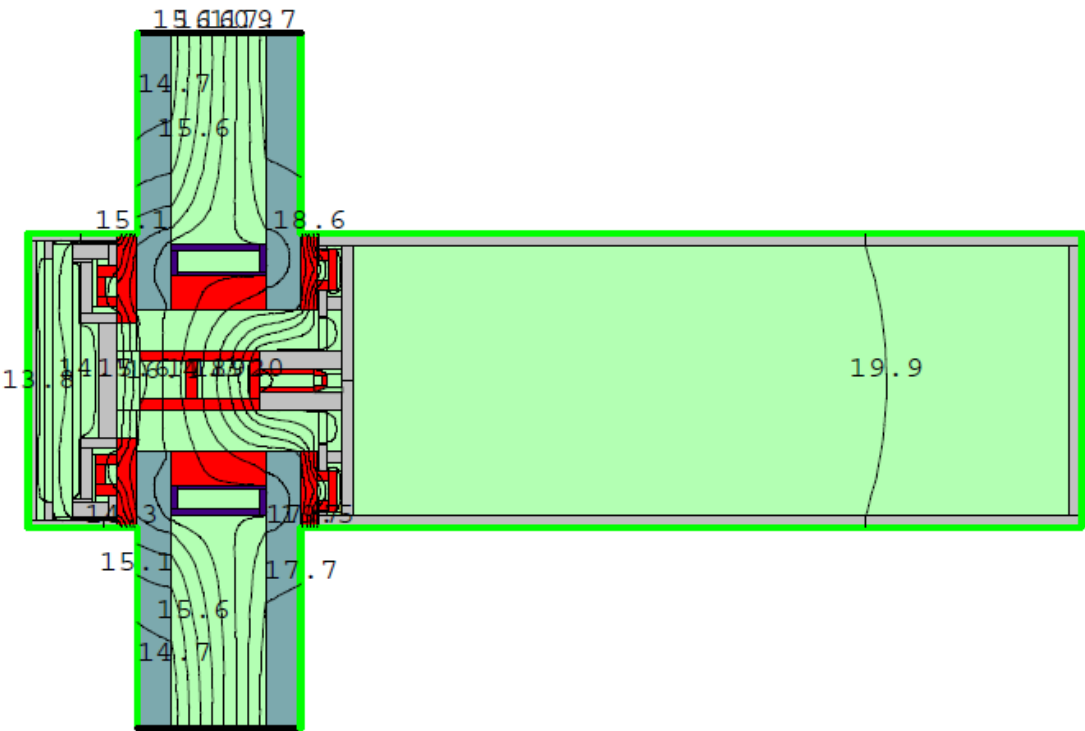
Para las cámaras de aire interiores se introduce en el programa en las propiedades del material la condición “Frame Cavity”.

La diferencia de temperatura entre el exterior y el interior es de 13°C a 21°C.

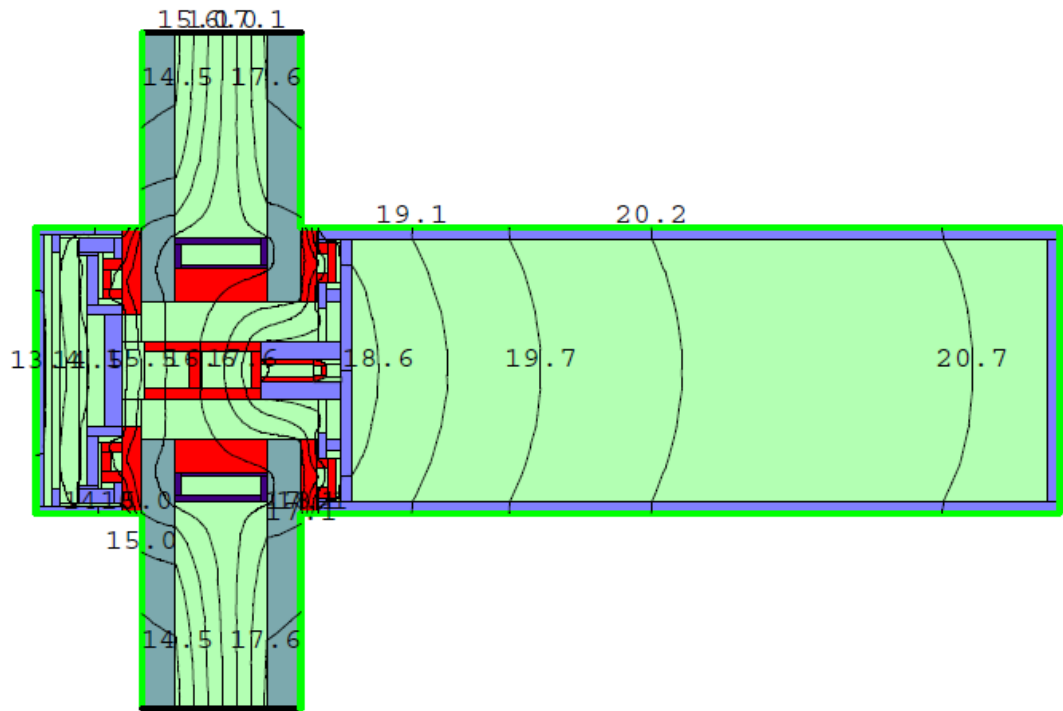
Con estas características se consiguen los siguientes resultados:

Esquema de resultados sobre las líneas de igual temperatura:

CON EL MARCO DE ALUMINIO

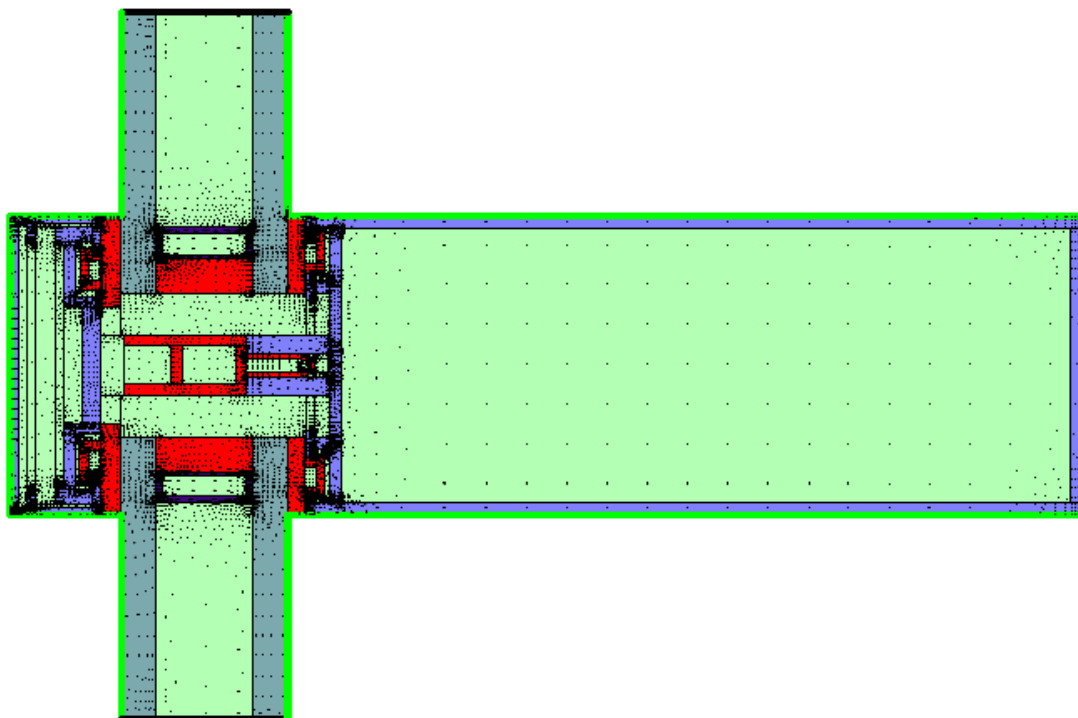


CON EL MARCO DE TITANIO

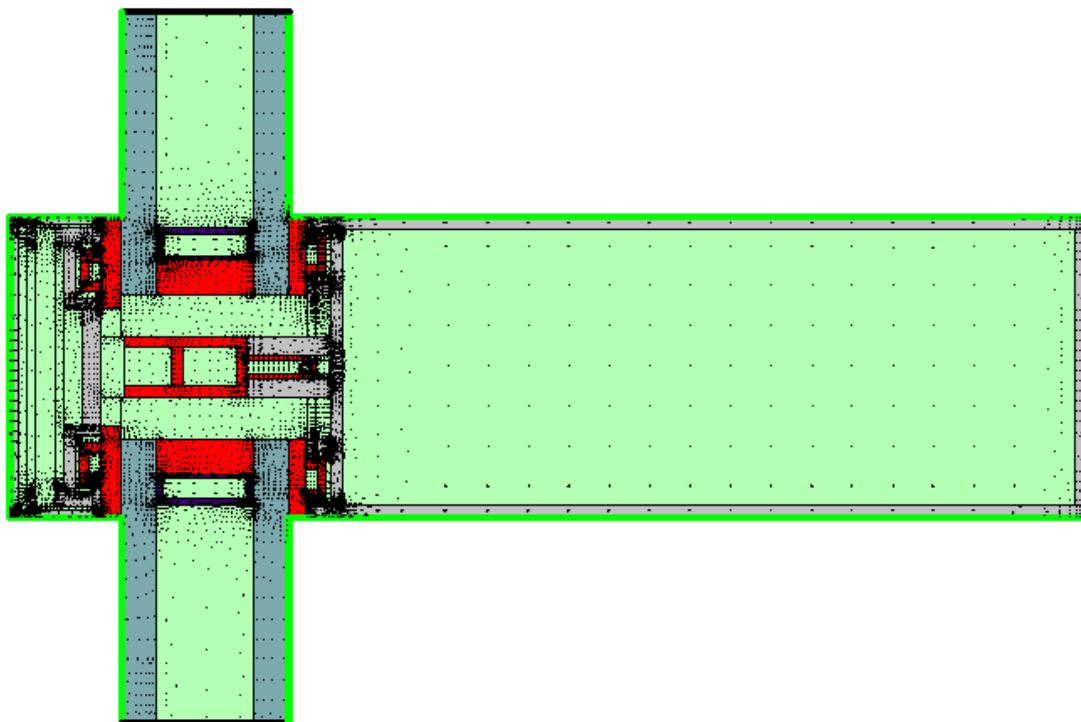


Los caminos preponderantes seguidos por el calor

CON EL MARCO DE ALUMINIO

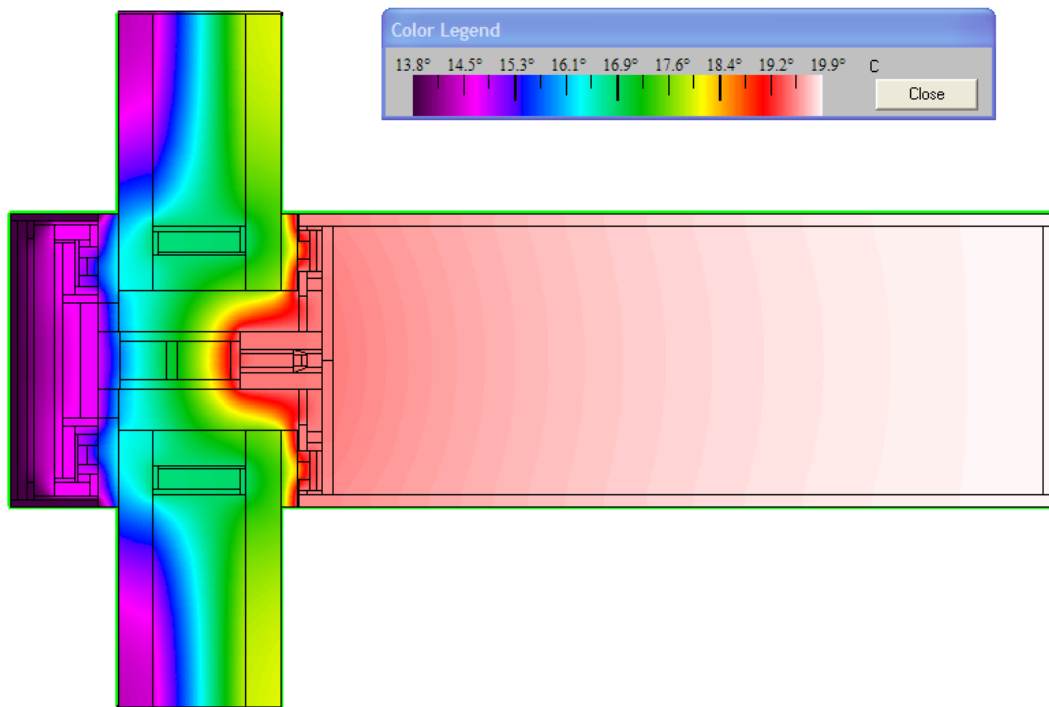


CON EL MARCO DE TITANIO

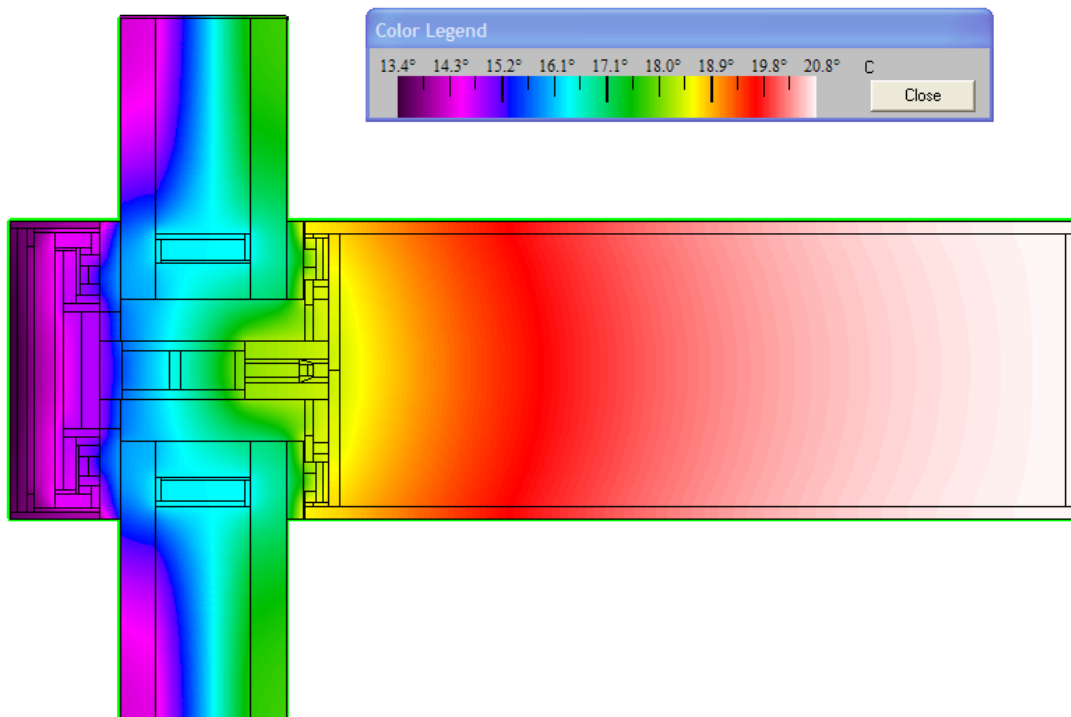


Simulación de temperaturas mediante escala de colores

CON EL MARCO DE ALUMINIO



CON EL MARCO DE TITANIO





Cálculo de la transmitancia

CON EL MARCO DE ALUMINIO

The image shows a software window titled "U-Factors" with a blue header bar and a red close button. The window contains three rows of data for different edge types. Each row has a label "Edge" followed by five input fields: "U-factor W/m2-K", "delta T C", "Length mm", "Rotation", and a dropdown menu. The data for each row is as follows:

Edge	U-factor W/m2-K	delta T C	Length mm	Rotation	Dropdown
Edge	1.5849	8.1	384.33	N/A	Total Length
Edge	4.5803	8.1	132.987	N/A	Projected X
Edge	5.1465	8.1	118.357	N/A	Projected Y

At the bottom left, there is a field for "% Error Energy Norm" with the value "8.81%". At the bottom right, there are two buttons: "Export" and "OK".

Total Length=384.33      U-factor =    1.58489

Projected X= 132.987      U-factor =    4.5803

Projected Y= 118.357      U-factor =    5.14646

## CON EL MARCO DE TITANIO

The image shows a software window titled "U-Factors" with a close button in the top right corner. It contains three rows of input fields for different edge types. Each row has columns for "Edge", "U-factor W/m2-K", "delta T C", "Length mm", "Rotation", and a dropdown menu. The first row is for "Total Length", the second for "Projected X", and the third for "Projected Y". At the bottom, there is a field for "% Error Energy Norm" and two buttons: "Export" and "OK".

Edge	U-factor W/m2-K	delta T C	Length mm	Rotation	Dropdown
	1.3606	8.1	384.33	N/A	Total Length
	3.9323	8.1	132.987	N/A	Projected X
	4.4183	8.1	118.357	N/A	Projected Y

% Error Energy Norm: 8.22%

Buttons: Export, OK

Total Length = 384.33      U-factor = 1.36065

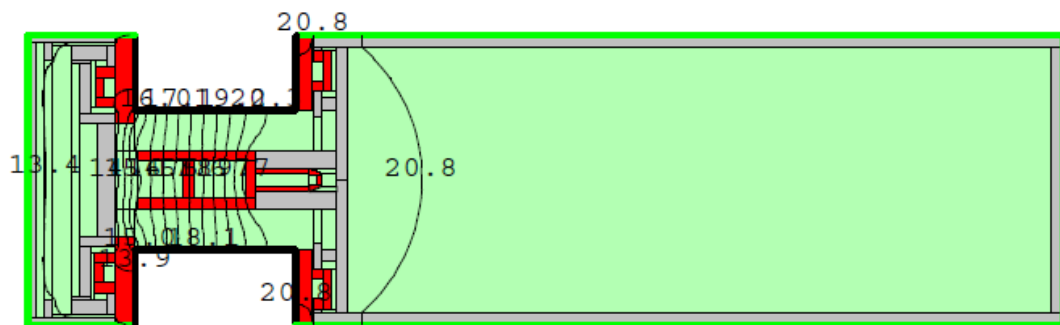
Projected X = 132.987      U-factor = 3.93225

Projected Y = 118.357      U-factor = 4.41831

Hay que tener en cuenta que al simular también el vidrio el valor de transmisión térmica que nos sale con el programa tiene en cuenta la parte proporcional de la parte de vidrio simulado, por lo tanto no es el valor correcto del U del perfil. Por esta razón vamos a realizar dos simulaciones diferentes más, tanto con aluminio como con titanio, teniendo en cuenta este factor. En estas se pueden ver mejoras en el factor U con respecto a las anteriores simulaciones.

Esquema de resultados sobre las líneas de igual temperatura:

CON EL MARCO DE ALUMINIO

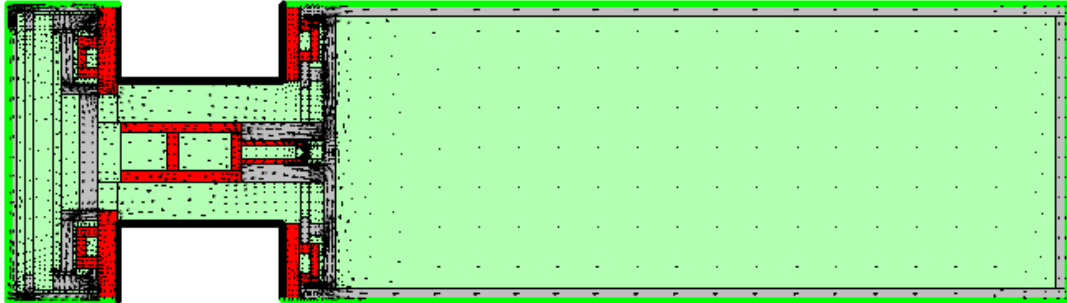


CON EL MARCO DE TITANIO

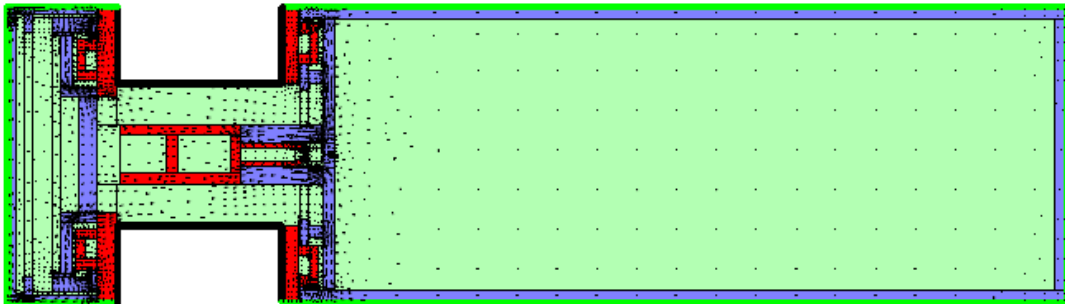


Los caminos preponderantes seguidos por el calor

CON EL MARCO DE ALUMINIO

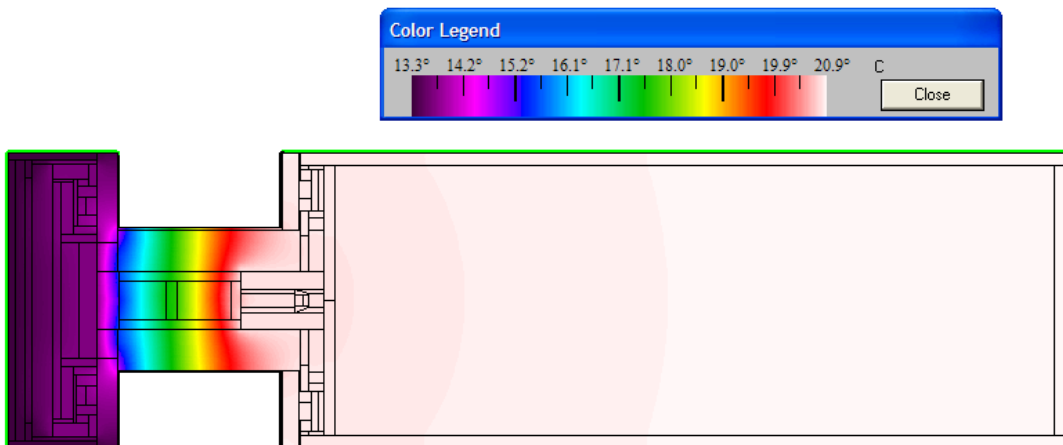


CON EL MARCO DE TITANIO

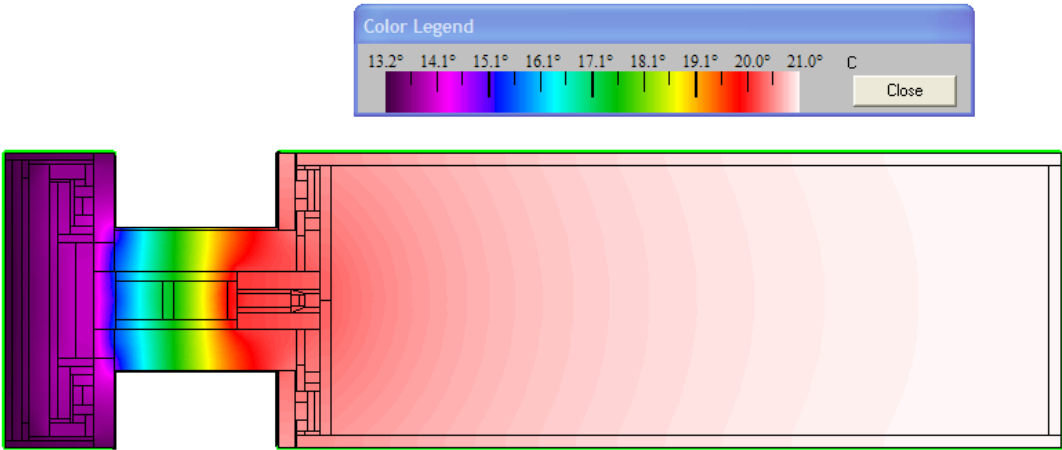


Simulación de temperaturas mediante escala de colores

CON EL MARCO DE ALUMINIO



CON EL MARCO DE TITANIO



Cálculo de la transmitancia

CON EL MARCO DE ALUMINIO

U-Factors

	U-factor W/m <sup>2</sup> -K	delta T C	Length mm	Rotation	
Edge	0.2481	8.1	315.969	N/A	Total Length
Edge	0.5895	8.1	132.987	N/A	Projected X
Edge	1.5681	8.1	49.9952	N/A	Projected Y

% Error Energy Norm 9.60%

Export OK

Total Length=315.969      U-factor =    0.248117

Projected X= 132.987      U-factor =    0.589511

Projected Y= 49.9952      U-factor =    1.56809

## CON EL MARCO DE TITANIO

Edge	U-factor W/m <sup>2</sup> -K	delta T C	Length mm	Rotation	
Edge	0.2176	8.1	315.969	N/A	Total Length
Edge	0.5171	8.1	132.987	N/A	Projected X
Edge	1.3755	8.1	49.9952	N/A	Projected Y

% Error Energy Norm: 8.91%

Export OK

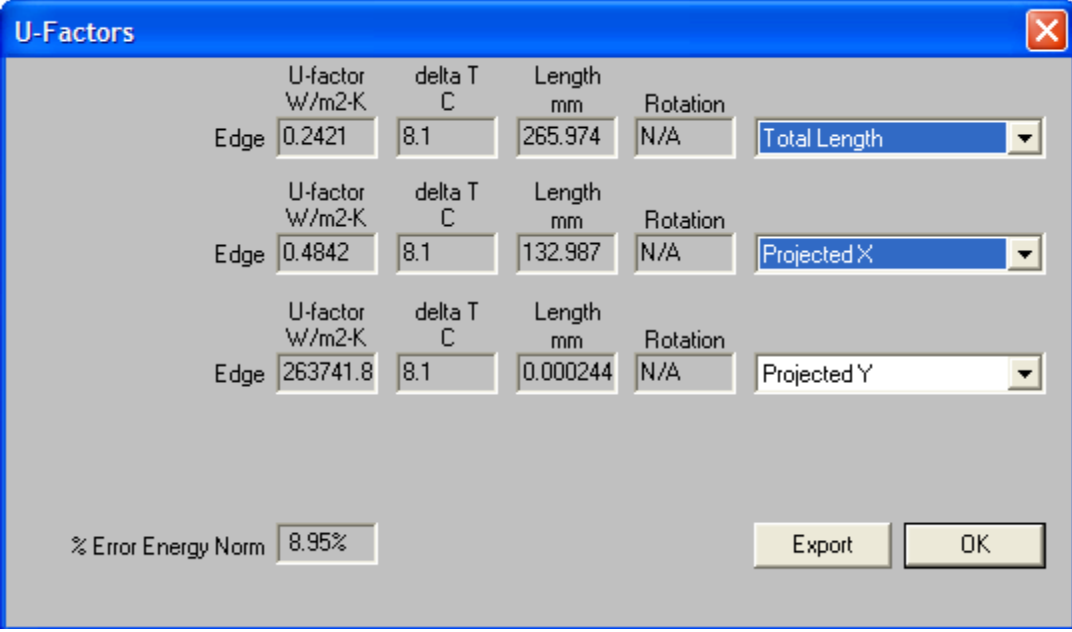
Total Length=315.969      U-factor =    0.217646

Projected X= 132.987      U-factor =    0.517113

Projected Y=49.9952      U-factor =    1.37552

Además se realiza un estudio de la influencia en la transmitancia reduciendo el espesor del titanio para reducir el precio final y el peso. Este estudio se realiza con perfiles de espesor 1 mm y con espesor de 0,4 mm. También se ha realizado una simulación con el mismo modelo pero cambiando el material del marco por el composite de polímero y fibra de vidrio (GFRC) del que se habla en la introducción de esta investigación, para comparar los resultados con este material que tiene un coeficiente de conductividad térmica de 0,3 W/mK. La transmitancia en x que se obtiene con esta simulación es de 0.376241 W/m<sup>2</sup>K. Esto implica una reducción del 36,18%. Sin embargo con el titanio se obtiene entre un 12 y un 18%.

CON 1 MM DE ESPESOR



The dialog box titled "U-Factors" displays thermal performance data for a 1 mm thick material. It contains three rows of data for different edge types, each with input fields for U-factor, delta T, length, and rotation, and a dropdown menu for the selection. At the bottom, there is a field for the percentage error in energy norm and two buttons: "Export" and "OK".

Edge	U-factor W/m <sup>2</sup> -K	delta T C	Length mm	Rotation	Selection
Edge	0.2421	8.1	265.974	N/A	Total Length
Edge	0.4842	8.1	132.987	N/A	Projected X
Edge	263741.8	8.1	0.000244	N/A	Projected Y

% Error Energy Norm: 8.95%

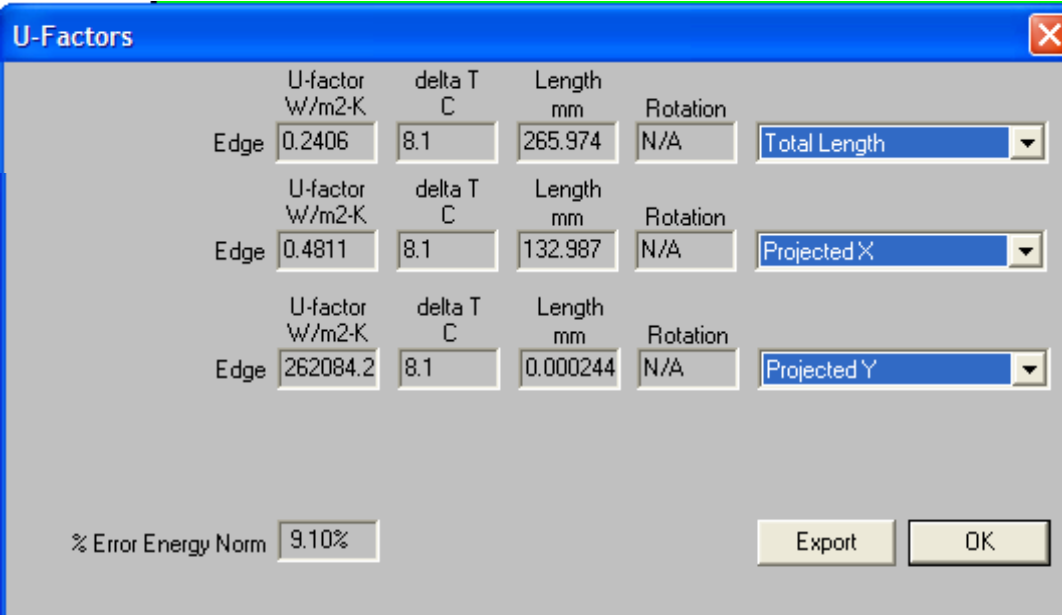
Buttons: Export, OK

Total Length=265.974      U-factor = 0.242092

Projected X= 132.987      U-factor = 0.484184

Projected Y=0.000244141      U-factor = 263742

CON 0,4 MM DE ESPESOR



The dialog box titled "U-Factors" displays thermal performance data for a 0.4 mm thick material. It contains three rows of data for different edge types, each with input fields for U-factor, delta T, length, and rotation, and a dropdown menu for the selection. At the bottom, there is a field for the percentage error in energy norm and two buttons: "Export" and "OK".

Edge	U-factor W/m <sup>2</sup> -K	delta T C	Length mm	Rotation	Selection
Edge	0.2406	8.1	265.974	N/A	Total Length
Edge	0.4811	8.1	132.987	N/A	Projected X
Edge	262084.2	8.1	0.000244	N/A	Projected Y

% Error Energy Norm: 9.10%

Buttons: Export, OK

Total Length=265.974      U-factor = 0.24057

Projected X= 132.987      U-factor = 0.481141

Projected Y=0.000244141      U-factor = 262084

## 2. Otras propiedades

Módulo de Young: El módulo de Young debe ser de al menos 10000 (N/mm<sup>2</sup>). El valor de este para el aluminio es de 68 - 71,5 GPa (68000-71500 N/mm<sup>2</sup>) y para el titanio es de 90 - 120 GPa (90000-120000 N/mm<sup>2</sup>). La siguiente tabla muestra esta diferencia más gráficamente, y se puede ver que el módulo del titanio es mejor o más alto:

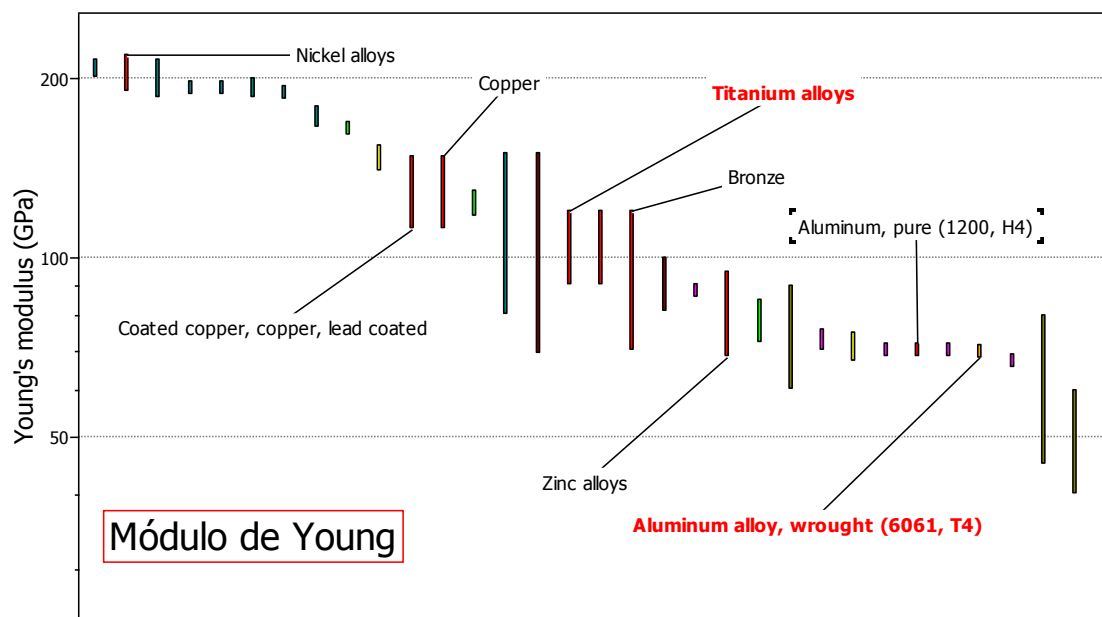


Fig. 26 Modulo de Young del aluminio y el titanio

Resistencia térmica: La resistencia térmica influye en la transmitancia de la fachada y ya ha sido estudiada previamente Sin embargo en la figura x se muestra una tabla con las resistencias térmicas para ver la diferencia entre el aluminio y el titanio (se aprecia que el titanio es nuevamente mejor en esta



característica y además se ve que tiene incluso más resistencia que el acero inoxidable).

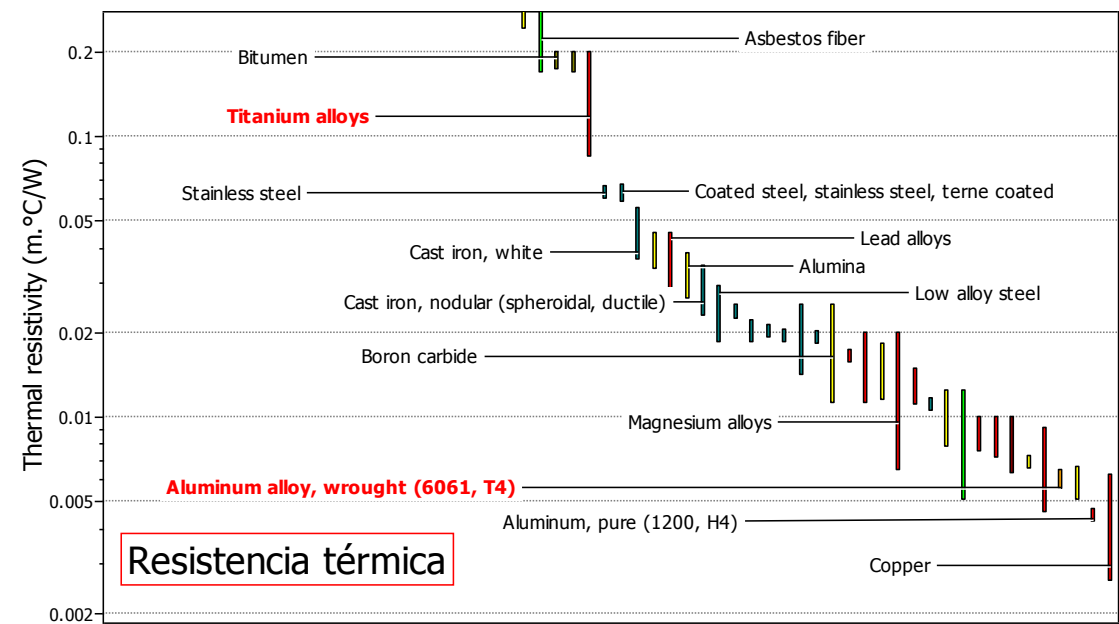


Fig. 27 Resistencia térmica del aluminio y el titanio

Temperatura de servicio: En esta propiedad también el titanio supera positivamente al aluminio.

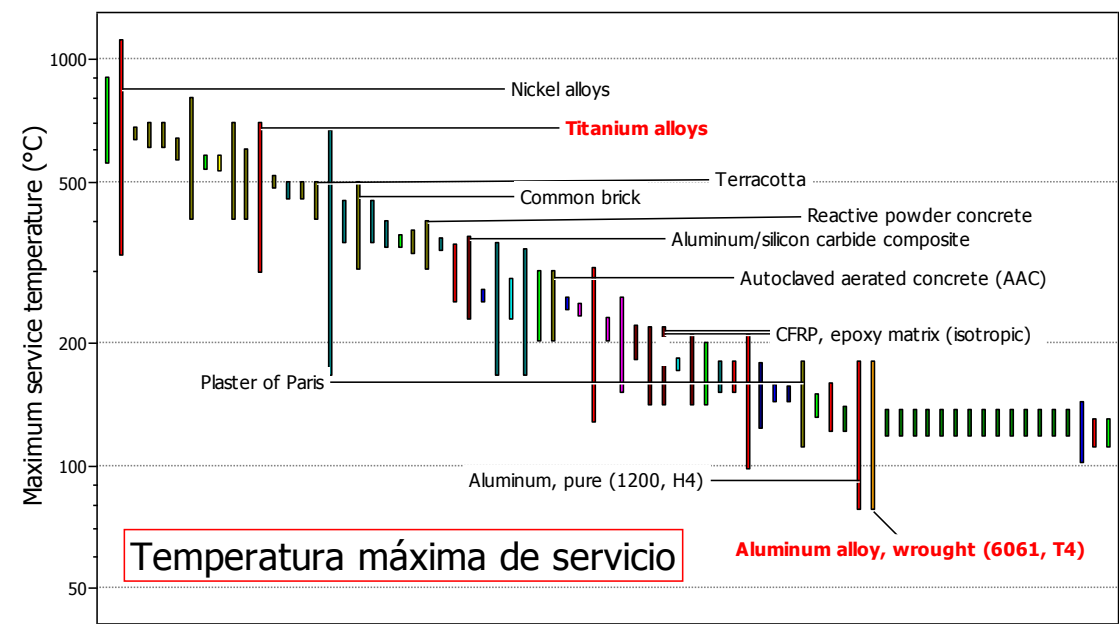


Fig. 28 Temperatura máxima de servicio del aluminio y el titanio

Coeficiente de expansión térmica: Incluso en esta propiedad el titanio se adapta mejor al coeficiente de expansión térmica del vidrio, que van desde 0 hasta  $10 \mu\text{strain}/^\circ\text{C}$ .

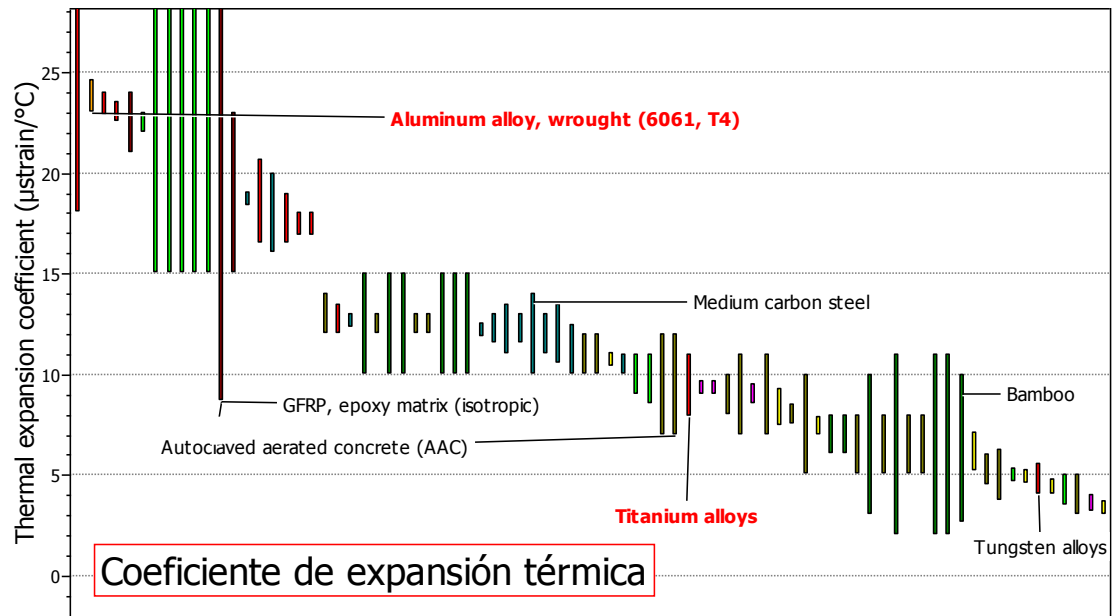


Fig. 29 Coeficiente de expansión térmica del aluminio y el titanio

Reciclabilidad: Tanto el titanio como el aluminio se pueden reciclar, pero se compara en este apartado la Energía englobada, la huella de  $\text{CO}_2$  en el reciclado y la fracción de reciclado actual. En estos tres factores se puede apreciar que el aluminio sí es más conveniente que el titanio, pero en parte se debe a la mayor producción de aluminio que de titanio.

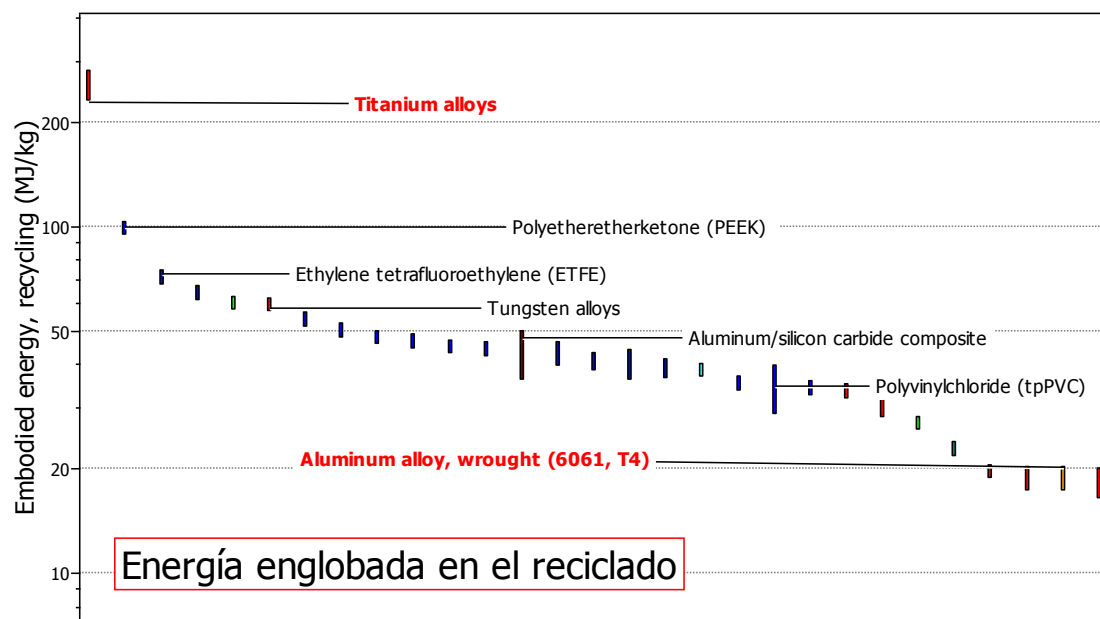


Fig. 30 Energía englobada en el reciclado del aluminio y el titanio

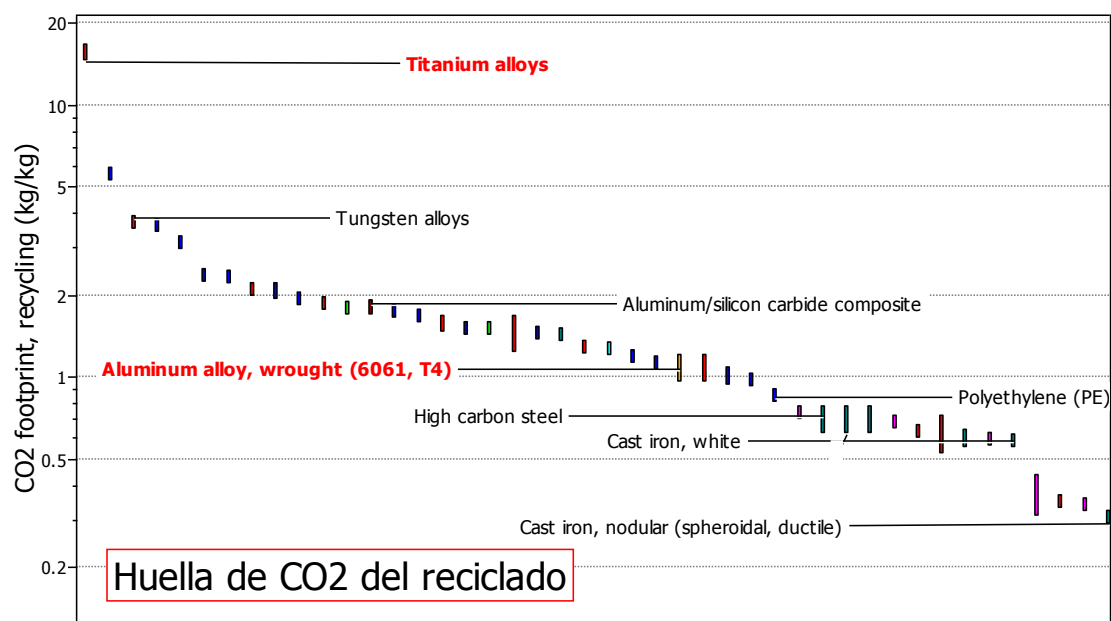


Fig. 31 Energía englobada en el reciclado del aluminio y el titanio

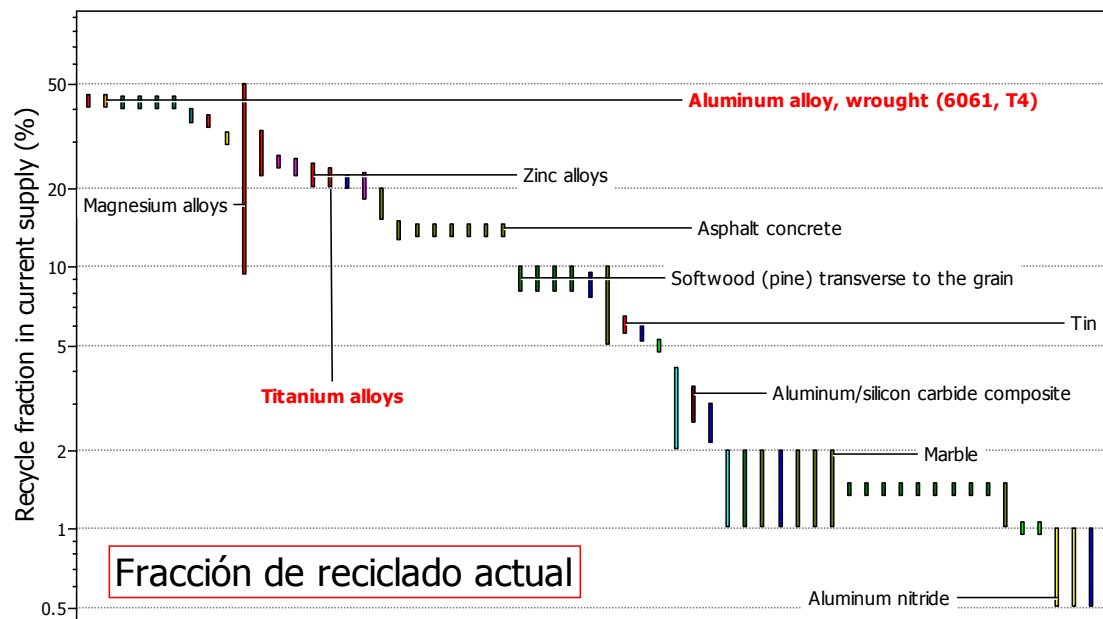


Fig. 32 Fracción de reciclado actual del aluminio y el titanio

Precio: como ya mencionado en esta investigación en el precio también es el aluminio más adecuado que el titanio. En la figura 33 se puede ver esta diferencia.

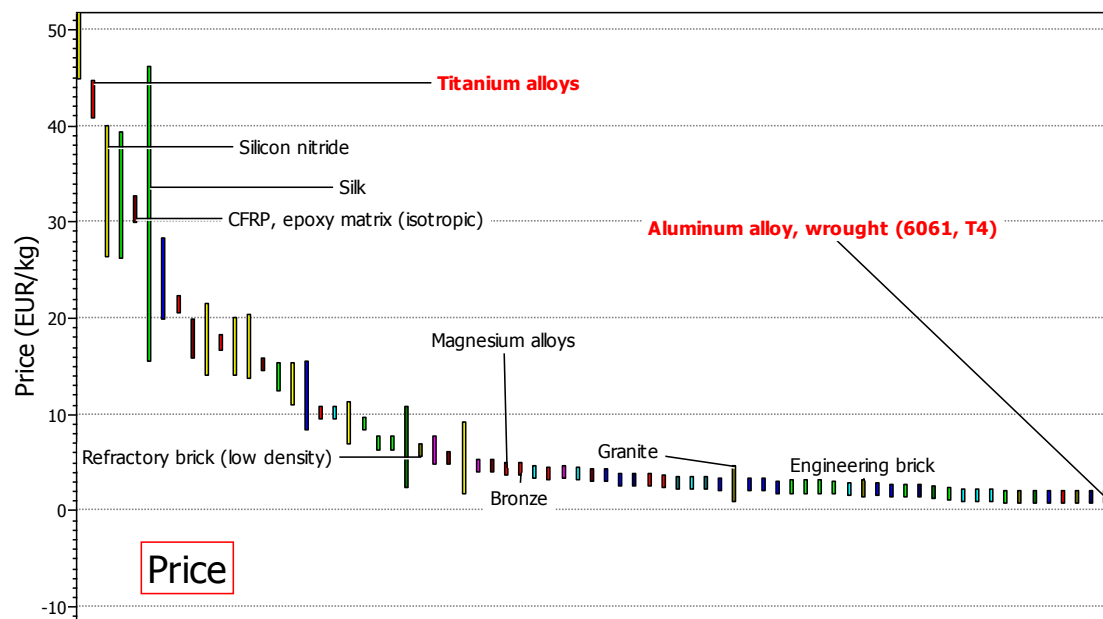


Fig. 33 Precio del aluminio y el titanio

Cuadro resumen de las diferencias entre el Aluminio y el titanio

Propiedad	Requisito	Aluminio	Titanio
Módulo de Young	$> 10000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	68 - 71,5 GPa	90 - 120 GPa
Resistencia térmica	$> 0,0055 - 0,0083 \text{ (mK/W)}$	0,0055 - 0,0065 m.°C/W	0,0833 - 0,2 m.°C/W
Temperatura de servicio	entre - 40° and 80°C	$< 77 - 180^\circ\text{C}$	$< 297 - 697^\circ\text{C}$
Coeficiente de expansión térmica	Similar al del vidrio 0-15 $\mu\text{strain/}^\circ\text{C}$	23 - 24,6	7,9 - 11
Reciclabilidad	Sí	Sí	Sí
Precio	Razonable	*1,22 – 1,34 EUR/kg	*40,6 – 44,7 EUR/kg

Fig. 34 Cuadro resumen de algunas propiedades del aluminio y el titanio

### 7.3 Análisis sobre el precio del titanio

A lo largo de esta investigación se puede apreciar que básicamente la desventaja del titanio frente al aluminio es su elevado precio momentáneamente. Por esta razón se dedica especialmente este capítulo a este tema con la intención de averiguar si este precio puede ser reducido en un futuro, en qué medida y bajo qué condiciones. Para este análisis se toman como datos los hallados en tres tipos diferentes de fuentes basándose en el libro: “Cómo se hace una Tesis”<sup>4</sup> de Umberto Eco en un capítulo que trata sobre cómo transformar un tema de actualidad en tema científico.

1. *Datos oficiales*: En este se recogen datos sobre el precio del aluminio y del titanio.
2. *Declaraciones de los interesados*: Se realiza para esto una interrogación sobre la opinión de diferentes miembros de empresas productoras de titanio o una recopilación de opiniones de científicos o técnicos especializados.
3. *Registros de escucha*: Esta tipo de fuente es un ejemplo del libro de Umberto Eco sobre varias radios, en este caso lo análogo sería registro de libros, artículos, noticias que hablen sobre el tema.

Para realizar a cabo un análisis sobre el precio del titanio y sus aleaciones es conveniente comenzar con la búsqueda y compilación de los distintos factores que influyen en este. Seguidamente se muestran y analizan las fuentes descritas anteriormente.

---

4 Libro “Cómo se hace una Tesis” de Umberto Eco. Pág. 51-58

Factores que influyen en el precio del titanio:

Extracción

Producción

Mercado reducido de productores

Baja demanda

Descubrimiento tardío

#### EXTRACCIÓN:

El proceso comúnmente usado para la extracción del titanio a partir del dióxido de titanio es el proceso de Kroll. Este proceso es caro, pues hay que hacerlo por lotes, es intensivo en mano de obra y bastante lento. Y se logran solo pocas toneladas de titanio al final del proceso, puesto que la producción masiva se ve imposibilitada por algunas limitaciones.

Pero, según el artículo de Katsutoshi Ono y Ryosuke O. Suzuki de la figura 10 de este trabajo, se piensa que el método FCC Cambridge reduce la demanda de energía para la extracción a la mitad. Este proceso es además continuo y no por lotes, por tanto se reduce el precio también debido a este factor.

#### PRODUCCIÓN:

La producción de perfiles o piezas de titanio es relativamente compleja. Por esta razón se encarece también el precio del material. El material necesita herramientas especiales para ser trabajado debido a su dureza y además tiene una memoria que no le permite doblarse en un ángulo de 90° después de haber trabajado con él una vez<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Afirmaciones de Gary Davis, empleado en Zahner Company.

## MERCADO REDUCIDO DE PRODUCTORES Y BAJA DEMANDA:

El titanio como se ha visto a lo largo de este trabajo tiene un rango de uso bastante reducido. Y al ser esta demanda tan reducida también existen pocas empresas que se dedican a su producción y extracción. Esto puede ser consecuencia al todavía alto precio de su extracción y producción.

Pero en un estudio realizado recientemente por SEGEMAR y la Universidad Nacional Gral. San Martín de Buenos Aires (25) se afirma que el titanio metálico y sus aleaciones han experimentado un notable desarrollo en los últimos años debido al incremento de su uso y la ampliación del mercado de sus aplicaciones. Y dicha evolución permite pronosticar una continuación sostenida en los próximos años, así como una disminución de sus precios. En los siguientes párrafos se analiza este estudio más a fondo.

## DESCUBRIMIENTO TARDÍO

El titanio como metal comenzó a ser comercializado a mediados del siglo XIX. Esta es pues una de las causas por la cual se ha trabajado poco tiempo en investigaciones relativas a éste y por tanto los avances han sido lentos, pero como se ha expresado en el anterior párrafo en el futuro se espera una reducción de su precio gracias a muchas investigaciones que se están realizando en el momento al respecto.

### 1. Datos oficiales:

Estos son los datos del precio de las aleaciones de titanio y de aluminio proporcionados por el programa CES de Cambridge:

Precio aleaciones de titanio	* 40.6	- 44.7	EUR/kg
Precio aleaciones de aluminio	*1,22	- 1,34	EUR/kg



Las siguientes gráficas muestran la fluctuación del precio del titanio en los últimos 3 años y el aumento en los últimos 6 meses. Y seguidamente los del aluminio.



Fig. 35 Precio del titanio en los últimos 3 años y 6 meses. (26)

El último precio que se puede apreciar en las gráficas 12.37 \$/LB, que equivale a 27.28 \$/Kg y con la divisa del 31 de agosto de 2011 a 18,95 Euros/Kg. El precio mínimo se contempló en verano del 2009 con 13 Euros/Kg.

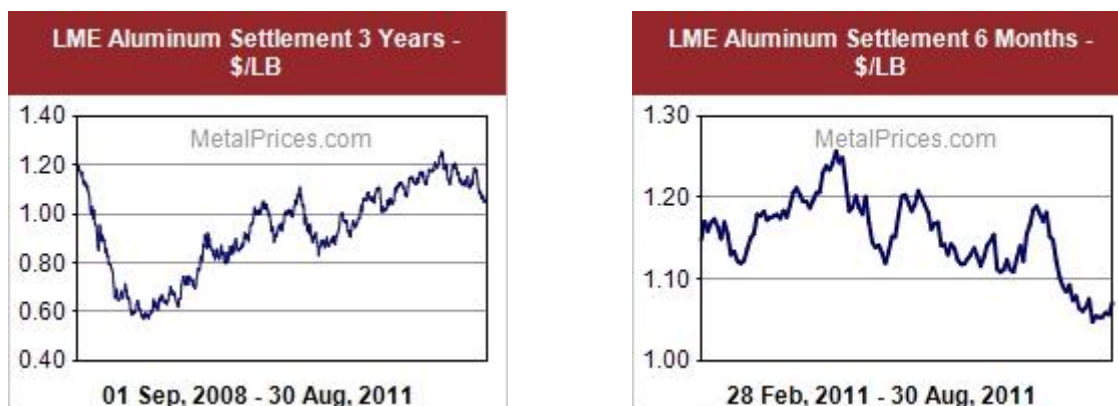


Fig. 36 Precio del aluminio en los últimos 3 años y 6 meses de London Metal Exchange. (26)

Los precios del aluminio oscilan en los últimos años de 0,89 Euros/Kg a 1,91 Euros/Kg.

Según estas tablas, el precio del titanio es entre 7 y las 21 veces mayor el del aluminio. El precio de perfil de aluminio de 130 mm para muros cortinas en la empresa Schüco en España es de 11,80 Euros. De titanio no existen datos.

## 2. Declaraciones de los interesados:

Se ha mantenido contacto con varios empleados de empresas productoras de titanio. Y principalmente se les ha pedido opinión sobre la viabilidad (en cuanto a precio y forma) de producir perfiles de titanio al igual que los perfiles ya existentes de aluminio y ya estudiados en este trabajo.

### a. Mrs Arianna Airaghi del departamento de ventas de Loterios S.p.a.

Según la señorita Arianna Airaghi la producción de perfiles con la sección estudiada en esta investigación es posible para la empresa Loterios S.p.a. Sobre el precio final del perfil no se han recibido datos.

### b. Wes Lewis, asesor técnico de la National Association of Architectural Metal Manufacturers.

El señor Wes Lewis informa que ninguna de las empresas a las que está al corriente de las pertenecientes a NAAMM realiza extrusiones de titanio. Por tanto una gran parte de las empresas productoras de titanio aún no realizan extrusiones, lo que significa que la nueva producción de perfiles sería muy costosa.

### c. Gary Davis de la compañía Zahner.

Gary Davis sostiene que su compañía podría revestir el perfil de aluminio con titanio por la elevada cantidad de 1200 \$/m<sup>2</sup>. Opina que realizar el perfil completamente en titanio es posible, pero su precio sería prohibitivamente caro. También cree que el precio tan elevado del revestimiento antes comentado es debido a que pocas empresas pueden realizarlo.

### 3. Registros de escucha:

#### (25) TENDENCIAS

Los minerales de titanio están sometidos a procesos cíclicos. Se da un período de crecimiento donde los precios aumentan y se amplían las inversiones. Pero entonces se pasa a un ciclo recesivo caracterizado por la abundancia de stock de mercadería y la caída de precios por la sobre-oferta.

(19) Miércoles 7 de Junio, 2006; “A Cleaner, Cheaper Route to Titanium” artículo de Neil Savage<sup>6</sup>:

El precio del titanio es de aproximadamente \$40 por libra. El titanio es sin embargo abundante en la naturaleza. Una empresa startup, Avanti Metal, usando una tecnología desarrollada por el MIT (Instituto de tecnología de Massachusetts), espera que un nuevo proceso del químico Donald Sadoway reduzca el coste de producir titanio. Se estima que se podría reducir el precio en \$3 por libra. El proceso de Kroll es tóxico y es difícil conseguir un permiso para construir una nueva planta (posible razón por la cual existen tan pocas plantas). Se espera conseguir suficientemente dinero de inversores para construir un prototipo para producir una piscina de titanio líquido para agosto de 2008. Esta reducción en el precio podría ser desde la mitad a diez veces menos pero necesitaría varios años. Investigadores de universidades y compañías como DuPont trabajan para encontrar mejores formas de producir titanio.

---

6 Copyright Technology Review 2011

(20) 18 de enero, 2004; “Altair Nanomaterials, Titanium Metals, Develop Low Cost Titanium Production”

Altair Nanotechnologies, Inc. Ha anunciado que su compañía subsidiaria Altair Nanomaterials Inc. tiene un contrato con Titanium Metals Corporation para desarrollar un proceso de producción más barato a partir del proceso FCC Cambridge. Será subvencionado por el Departamento de Defensa, y por Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Altair recibirá \$150,000 durante los 6 primeros meses.

Este proceso usa dióxido de titanio y se calcula que de 1,67 libras de titanio se pueda conseguir una libra del metal.

DARPA da a Titanium Metals Corporation 12,3 millones de dólares para un programa de cuatro años con investigadores de varias instituciones e universidades como la de Berkeley y la Universidad de Cambridge.

El proceso FCC Cambridge tiene el potencial para reducir el coste del titanio.

Altair cree en su habilidad para controlar el tamaño de la partícula del dióxido de titanio, su forma y su estructura.

El titanio es caro solo por el proceso de refinado del mineral a metal con muchos pasos y a elevadas temperaturas.

AMPTIAC, un departamento de publicaciones estima que el titanio se produce veinte veces menos de su volumen potencial mundial. Y se cree ampliamente que una reducción en el precio aumentará la demanda y sus aplicaciones.

(21) En el fórum en internet “PhysOrg scientific forums” Richard Saam formula la pregunta el día 8 de junio de 2004:

*“Anybody have a feel for the FCC Cambridge Titanium Electrolytic Production Process and if it will bring down the price of titanium at some foreseeable future date as projected?”*

*“Alguien tiene una idea sobre el Proceso de producción de titanio FCC Cambridge y de si reducirá el precio del titanio en una fecha futura predecible como lo previsto?”*

No casualmente en torno a esta pregunta se mueve este capítulo. A continuación se muestran algunas de las respuestas que dieron algunos expertos:

Havirrion, 8 de junio de 2004; Opina que el precio del titanio no se reduciría puesto que el elevado precio del titanio se debe a la dificultad de su trabajabilidad.

Robert Copcutt, 11 Junio de 2004; Sostiene que el proceso FCC producirá un polvo y el impacto de reducción del precio podría producirse con la combinación del proceso FCC junto a técnicas de pulvimetalurgia. El procesado de los minerales tendría que ser economizado aprovechándose de la habilidad de este proceso para poder usar óxidos mezclados. Pero todo esto necesita mucho tiempo de espera y una inversión aún mayor de la que ha proporcionado la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency).

Un invitado anónimo, 14 Marzo de 2005; Afirma que en gran parte el coste del titanio se debe a la dificultad de extraerlo y no a la dificultad de trabajar con éste. Además piensa que el proceso FCC es un proceso mucho más eficiente económicamente que el Kroll por ser un método continuo y no en fases.

Gan, 13 Junio 2006; Comenta que la QuinetiQ, empresa de la DERA (Defence Evaluation and Research Agency), tenía algún tipo de problemas legales con BTi (Biotechnology Institute) y eso podría ser la causa del desconocimiento del desarrollo de los avances sobre el proceso.

## **8 RESULTADOS OBTENIDOS**

### **8.1 Estudio sobre titanio para muros cortina y conclusiones parciales**

En el capítulo 7.1 se estudia la viabilidad de la introducción de titanio para la construcción de muros cortina. Para ello se realiza un análisis de comprobación de que todos los requisitos necesarios sean cumplidos y se realiza una tabla donde se puede comprobar que las propiedades del material requeridas se cumplen.

Por otra parte se comprueba la posibilidad de formar al material para la realización de perfiles y chapas. Con la ayuda del programa CES y con la confirmación de empresas de producción de titanio, se puede llegar a la conclusión de que la realización de perfiles es viable.

De igual forma se comprueba la durabilidad y la resistencia a la intemperie. Tampoco se encuentran impedimentos.

Consecuentemente se puede afirmar que las condiciones indispensables para el uso del titanio para los perfiles de los muros cortinas están presentes y por tanto es posible su introducción.

### **8.2 Comparativa del titanio con el aluminio en muros cortina y conclusiones parciales**

En el capítulo 7.2 se realizan simulaciones con el programa THERM con el fin de comparar la transmitancia de los marcos de los muros cortina entre el titanio y el aluminio.

Primeramente se realizan simulaciones con un modelo en el que se considera también parte del acristalamiento tanto con titanio como con aluminio con las propiedades descritas en el capítulo 7.2. En los dos casos se considera

un coeficiente de conductividad térmica favorable dentro del rango de cada uno de los dos materiales para que la comparación sea más realista. Se han realizado simulaciones sobre las líneas de igual temperatura, los caminos preponderantes seguidos por el calor y de temperaturas mediante escala de colores. También se obtienen resultados sobre el factor U o transmitancia. Sin embargo en las siguientes tablas sobre resultados solo se muestran los valores de transmitancia, pues son los más significativos en este estudio. Ya en esta simulación se puede apreciar una reducción de la transmitancia en x de 4,5803 a 3,93225, lo que supone una reducción del 14,15 %.

Tabla de resultados de transmitancia del modelo con parte de acristalamiento

<b>Simulación</b>	<b>Aluminio con parte del acristalamiento 2 mm</b>	<b>Titanio con parte del acristalamiento 2 mm</b>
<b>U</b> Longitud total= 384.33 mm	U-factor = 1.58489	U-factor = 1.36065
<b>Ux</b> Longitud en X= 132.987 mm	U-factor = 4.5803	U-factor = 3.93225
<b>Uy</b> Longitud en Y= 118.357 mm	U-factor = 5.14646	U-factor = 4.41831

Más tarde se realizan simulaciones con un modelo en el que no se considera parte del acristalamiento sino solo el marco, tanto con titanio como con el aluminio con las propiedades descritas en el capítulo 7.2. Y además se realizan simulaciones con titanio reduciendo el material de los perfiles. Se reduce cambiando el espesor del perfil interior de 2 mm a 1 mm y a 0,4 mm respectivamente. En la tabla que se muestra a continuación se pueden ver los resultados. Para estas dos últimas simulaciones se muestra solo el resultado de la transmitancia en X, puesto que en las demás se cambia la longitud y ya no se podrían comparar. Estas dos últimas simulaciones se realizan para comprobar si el valor Ux de la transmitancia se reduce reduciendo el material para así reducir el precio, puesto que la resistencia mecánica sería suficiente para la función de perfil en muros cortina.

Tabla con los resultados de transmitancia del modelo sin acristalamiento

<b>Simulación</b>	<b>Marco de aluminio 2 mm</b>	<b>Marco de titanio 2 mm</b>	<b>Marco de titanio 1 mm</b>	<b>Marco de titanio 0,4 mm</b>
<b>U</b> Longitud total= 315.969 mm	U-factor = 0.248117	U-factor = 0.217646		
<b>Ux</b> Longitud en X= 132.987 mm	U-factor = 0.589511	U-factor = 0.517113	U-factor = 0.484184	U-factor = 0.481141
<b>Uy</b> Longitud en Y= 49.9952 mm	U-factor = 1.56809	U-factor = 1.37552		

En la siguiente tabla se pueden ver los valores de transmitancia en x de las cuatro simulaciones realizadas para el marco de muro fachada. En esta se puede apreciar que también se reduce la transmitancia con los tres tipos de simulaciones con titanio. Se consigue una menor transmitancia incluso con menores espesores de titanio, lo cual reduce el precio también. Esto puede deberse a que la reducción se produce en el interior del perfil, con lo cual la cámara de aire se aumenta. Y como se puede ver en las gráficas de los caminos preponderantes seguidos por el calor, estos son principalmente por el metal, tanto con aluminio como con titanio, que por la cámara dentro del perfil.

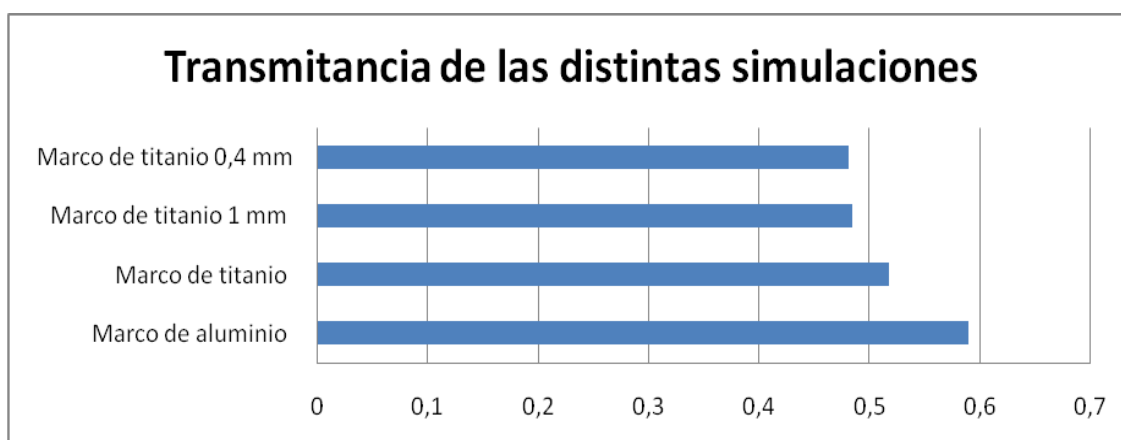


Fig. 37 Gráfica con los resultados de transmitancia de los modelos sin acristalamiento



En la tabla siguiente se muestra la reducción en tanto por ciento que se experimenta en la transmitancia en x en las tres simulaciones con respecto a la transmitancia con aluminio.

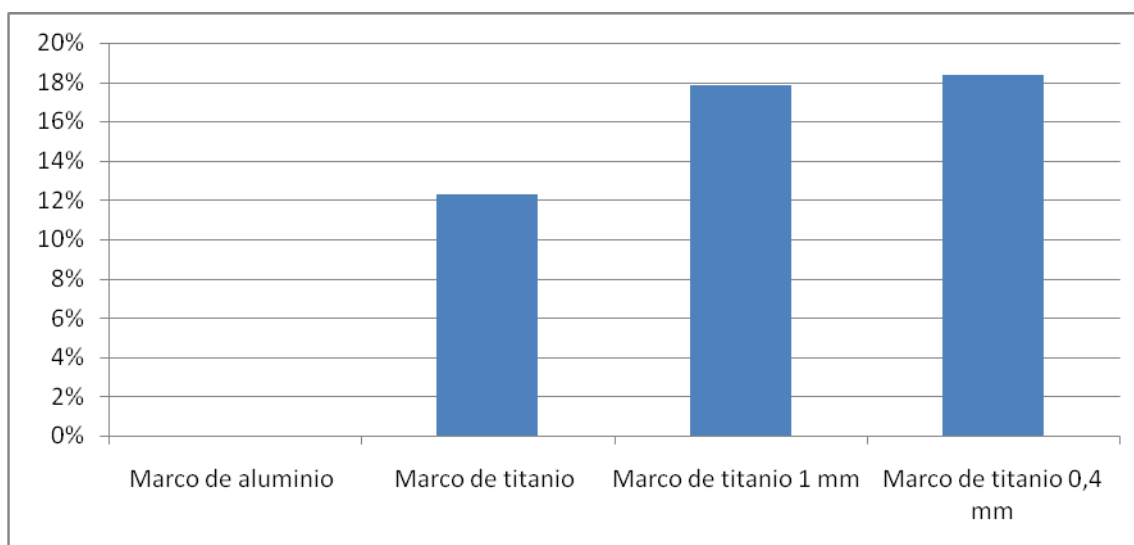


Fig. 38 Gráfica con la reducción en % de transmitancia en los modelos sin acristalamiento

Tabla con los valores en % de reducción de transmitancia de las simulaciones

Simulación	Marco de titanio	Marco de titanio 1 mm	Marco de titanio 0,4 mm
Reducción en % de $U_x$ con frente al aluminio	12,28%	17,87%	18,38%

Básicamente se llega a la conclusión de que se puede ratificar la hipótesis inicial de que la sustitución del aluminio por titanio mejoraría el comportamiento térmico del marco en el muro cortina. E incluso es mejor si el espesor se reduce. Pero teniendo en cuenta la diferencia de precio de estos dos materiales, una reducción de entre el 12% y el 18% no es tan rentable para este tipo de elemento constructivo, ya que su buen comportamiento se debe más a su forma especial y a la introducción de cámaras de aire. Sin embargo una simple chapa de titanio reduce la transmitancia lineal entre 10 y 50 veces.

### **8.3 Análisis sobre el precio del titanio y conclusiones parciales**

Los factores que influyen en el precio del titanio son la:

**EXTRACCIÓN:** El proceso comúnmente es el proceso de Kroll. Este proceso es caro, pues hay que hacerlo por lotes, es intensivo en mano de obra y bastante lento, pero se piensa que el método FCC Cambridge reduce la demanda de energía para la extracción y es continuo.

**PRODUCCIÓN:** La producción de perfiles o piezas de titanio es relativamente compleja y material necesita herramientas especiales lo que encarece su precio.

**MERCADO REDUCIDO DE PRODUCTORES Y BAJA DEMANDA:** Las aplicaciones del titanio son pocas y pocas empresas se dedican a su producción y extracción y eso aumenta su precio. Pero se puede pronosticar una disminución de sus precios.

**DESCUBRIMIENTO TARDÍO:** El titanio comenzó a ser comercializado hace poco, y por esta causa se ha investigado poco con él y es caro aún, pero se están realizando muchas investigaciones en el momento al respecto.

El precio del titanio fluctúa entre 13 y 18,95 Euros/Kg en los últimos tres años y es entre 7 y las 21 veces mayor el del aluminio según las tablas de [www.metalprices.com](http://www.metalprices.com).

Algunos expertos opinan que es muy probable que el precio del titanio se reduzca en un futuro próximo gracias a nuevos métodos producción como el FCC, pero otros dudan de esta reducción puesto que sostienen que la dificultad de trabajar con el titanio encarece su precio y no solo el método de extracción usado. Algunos también creen que es caro pues pocas empresas trabajan con titanio. Existen varias investigaciones o programas para intentar reducir el precio del titanio pero no se aún han encontrado resultados al respecto.

## 9 CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo se pueden resumir así:

- La introducción de titanio es viable mecánicamente, el principal inconveniente es el precio: en los antecedentes se concluía que hay estudios para la mejora de la resistencia mecánica del titanio a base de nuevos tratamiento térmicos en distintas fases del titanio. Algo que puede servir para reducir los espesores mínimos y aumentar el módulo de Young y consecuentemente reducir el precio y el material necesario. Además se descubre que en el modelo de perfil simulado en este trabajo, con menores espesores se obtiene mejores resistencias térmicas.
- Térmicamente el marco de titanio en muros cortina funciona mejor que el aluminio pero no hay diferencias especialmente significativas que compensen el alto precio del titanio.
- El precio del titanio es una desventaja, pero se están realizando estudios actualmente para reducir su precio con la ayuda de nuevos métodos de obtención de éste a partir del mineral. Pero finalmente se puede afirmar que el precio del titanio y su reducción, gracias a estos nuevos métodos de extracción y producción es posible pero aún intangible.
- El titanio se ha usado ya en la construcción y en la arquitectura en bastantes edificios y además se le reconoce como un material muy interesante para muchos edificios de tipo experimental puesto que se puede formar fácilmente, por esta razón se propone como idea extraída de este trabajo, el revestimiento de dióxido de titanio para reducir la contaminación.



## **10 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

### **10.1 Revestimientos con $\text{TiO}_2$ en chapa de titanio**

Se realiza un análisis de los procesos de reciclaje y de los usos o funciones que se podrían dar al Titanio y al  $\text{TiO}_2$  soportado sobre el metal en la construcción.

Metodología a seguir:

Búsqueda y contraste de información analíticamente o empíricamente

#### **1. Búsqueda bibliográfica y documental**

Primeramente se lleva a cabo una recapitulación sobre los procesos industriales que se llevarían a cabo tanto para la inclusión del titanio, sus aleaciones o el  $\text{TiO}_2$  en materiales o sistemas constructivos. Y también sobre los revestimientos que soporta el titanio para decidir cuáles serían los revestimientos con  $\text{TiO}_2$  que serán estudiados en esta investigación. Asimismo en relación con el  $\text{TiO}_2$  y su función fotocatalítica.

#### **2. Análisis**

Más tarde un análisis de los procesos de reciclaje y de los usos o funciones que se podría dar al Titanio y al  $\text{TiO}_2$  soportado sobre el metal en la construcción.

El análisis de materiales nos daría la posibilidad de realizar varios análisis experimentales.

Una de las ideas a desarrollar experimentalmente sería la oxidación del titanio. Sobre la superficie de Ti metálico (sustrato), mediante oxidación superficial se propone sintetizar una delgada capa de  $\text{TiO}_2$ .

Se trata de obtener sobre un soporte metálico de Ti, una superficie de  $\text{TiO}_2$  variedad Anatasa, que cumpliría con los requisitos "internos" del Ti y con los externos como material fotocatalítico soportado. Y por otro lado podemos pensar en diferentes vías de oxidación:

- Horno con  $\text{O}_2$ ,
- Electroquímico (como el anodizado del aluminio),
- Oxidación química por vía húmeda.

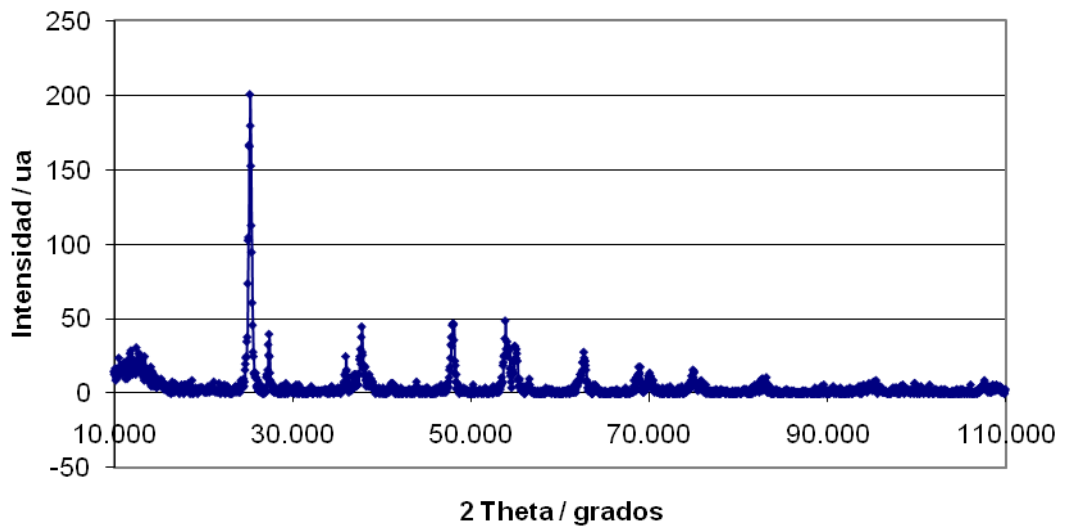
Todos los productos producidos se caracterizarían mediante difracción de rayos X, con el difractómetro de rayos X D-5000, disponible en la Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

## **10.2 Estudios sobre el funcionamiento del $\text{TiO}_2$ sobre el titanio**

Uno de los objetos de estudio sería un revestimiento a partir de la oxidación del titanio. Sobre la superficie de Ti metálico se sintetiza una delgada capa de  $\text{TiO}_2$  mediante oxidación superficial.

En las tablas siguientes se pueden ver la gráfica de difracción de los productos para realizar los revestimientos. Tanto de rutilo como de anatasa.

### TiO<sub>2</sub> Degussa P-25



### TiO<sub>2</sub> Cronos

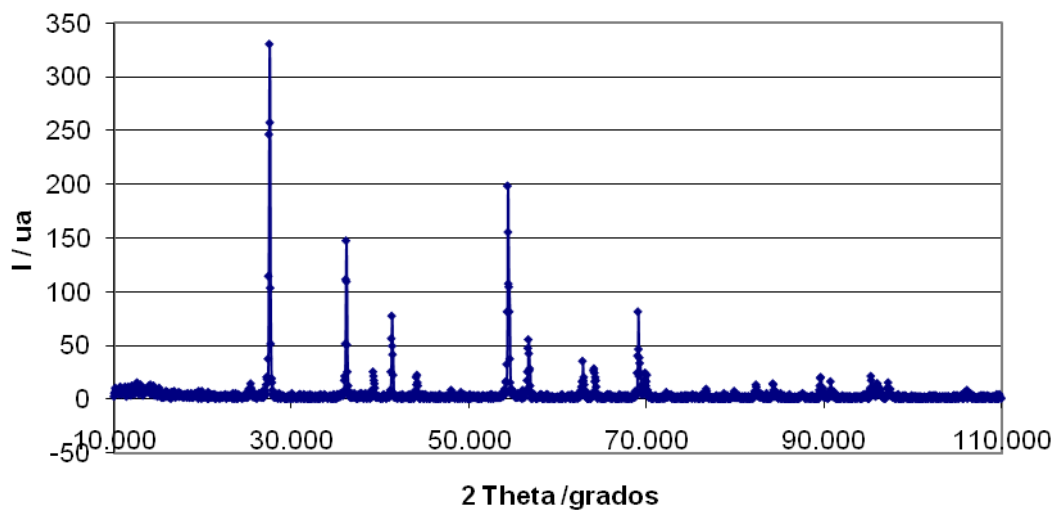


Fig. 39 Gráficas de difracción de los materiales para revestir el titanio (rutilo y anatasa)

### 10.2.1 Ensayos sobre el comportamiento catalítico

Uno de los objetivos de revestir el titanio con dióxido de titanio es aprovecharse de su capacidad como material fotocatalítico. Este material es capaz de purificar el medio ambiente. Por esta razón es conveniente estudiar en qué grado funciona esta idea.

### 10.2.2 Propiedades de titanio más el revestimiento de $\text{TiO}_2$

Tras la realización de los productos y su caracterización mediante difracción de rayos X, con el difractómetro de rayos X D-5000 y de los ensayos para obtener las nuevas propiedades, se pretenden obtener unos resultados que ayudarán a sacar unas conclusiones de esta futura investigación.

## **10.3 Variación del color en función del ángulo de incidencia que presenta el Ti metálico con una capa de $\text{TiO}_2$**

En la foto de la bodega de la página 37 se observa este fenómeno. [10] Esta variación del color es función del ángulo de incidencia que presentaría el Ti metálico recubierto de una capa de  $\text{TiO}_2$  (Luster Pigments) y en función del espesor se consigue un color u otro. Existen varias patentes sobre la realización de revestimientos de  $\text{TiO}_2$  listados en la bibliografía de este trabajo.

## **10.4. Revestimiento de $\text{TiO}_2$ en fachadas de aluminio**

Debido al elevado precio y la dudosa viabilidad del titanio como material común en las fachadas se podría estudiar la posibilidad de combinar paneles de aluminio con revestimiento de dióxido de titanio.



## BIBLIOGRAFÍA

[1] Michael F. Ashbey. "Materials selection in mechanical design" Spektrum Akademischer Verlag. München. 2007.

[2] Programa informático CES de GRANTA.

[3] Varios autores. Enciclopedia de Ciencia y Técnica. Tomo 13. Titanio. Salvat Editores S.A. 1984.

[4] Tarín Remohí, Pascual. "El titanio y sus aleaciones. Aleaciones para Estructuras Aeroespaciales. Materiales Estructurales para Sistemas Propulsivos. Cuarto curso – Intensificaciones A y B. Segundo semestre". Sección de publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la UPM. Madrid. Ed. Febrero 1999.

[5] Tarín Remohí, Pascual. "Aleaciones de titanio". Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la UPM. Madrid. Setiembre 2010.

[6] Paniagua Caparrón, José León. "Estructuras ligeras. Campo de aplicación de los nuevos materiales estructurales dentro del diseño arquitectónico". Madrid. 1982. (Tesis doctoral).

[7] Leyens, Christoph y Peters, Manfred ."Titanium and titanium alloys". Wiley - VCH. Agosto 2003.

[8] Lütjering, Gerd y Williams, James C. "Titanium. Engineering Materials". Springer. Junio 2007.

[9] Eco, Umberto. "Como se hace una tesis". Gedisa. Barcelona. 2003.

[10] Varios autores. "Industrial Inorganic Pigments". VCH. Beinhem, Alemania. 1993.

## Revistas, artículos y patentes

Bickley R.Y; González-Carreno,T;Lees, J.L;Tilley,R.J " A estructural Investigation of titanium dioxide photocatalysts" Journal of solid state chemistry 92 (1991) P 178-19.

Maira, A.J. (1.998). "Fotooxidación en fase gas de etanol, acetona y metil etil cetona sobre TiO<sub>2</sub> anatasa". Tesis. Instituto de Catálisis y petroleoquímica (CSIC).

Milis, A; Le Hunte, S. (1.997). "An overview of semiconductor photocatalysis". Journal of photochemistry and photobiology chemistry. 108. P 1-35.

Sánchez,B;Avila, P., A. Bahamonde, J. Blanco, A.I. Cardona, and M. Romero. Gasphase photo-assisted mineralization of volatile organic compounds by monolithic titania catalysts. Applied Catalysis B.Environmental 17: 75-88, 1998.

Arquitectura viva. Número 55 Julio-agosto 1997. "Guggenheim Bilbao. Frank Gehry, un museo americano y vasco".

Análisis químico del pigmento dióxido de titanio. MELC-12.23. Laboratorio central de ensayo de materiales de construcción. Madrid 1964.

Patente: "Process for producing crystalline titanium oxide coating film through electrolytic anodizing". Teruki Takayasu, Kinji Onoda

Patente: "Method of forming an adhesion promoting oxide surface on titanium in which the titanium surface is first abraded and then anodized in hydrofluoric acid free chromic acid". Smith; Blair A.

Patente: "Method and electrolytes for anodizing Titanium and its alloys". Earl W. Kendall, Bonita, California.

## Páginas de Internet

- (1) <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/CYTED/13cap07.pdf>
- (2) <http://es.wikipedia.org/wiki/Titanio>
- (3) [http://translate.google.es/translate?hl=es&langpair=en|es&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium\\_tetraiodide](http://translate.google.es/translate?hl=es&langpair=en|es&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_tetraiodide)
- (4) [http://www.gemsbrokers.org/piedra\\_preciosa/comprar\\_piedras\\_preciosas/comprar\\_piedras\\_india.htm](http://www.gemsbrokers.org/piedra_preciosa/comprar_piedras_preciosas/comprar_piedras_india.htm)
- (5) <http://es.wikipedia.org/wiki/Rutilo>
- (6) <http://www.italcementigroup.com/ENG/Research+and+Innovation/Innovative+Products/TX+Active/>
- (7) <http://www.fiberline.com/>
- (8) <http://www.rae.es/rae.html>
- (9) [http://www.quiminet.com.mx/art/ar\\_%25C5R%25B9%25CE%25C7HX%25BE.php](http://www.quiminet.com.mx/art/ar_%25C5R%25B9%25CE%25C7HX%25BE.php)
- (10) <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ti.htm>
- (11) <http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Ti.html>
- (12) [http://www.uclm.es/profesorado/fcarrillo/QINORGAVANZ/Trans\\_grupo4.pdf](http://www.uclm.es/profesorado/fcarrillo/QINORGAVANZ/Trans_grupo4.pdf)
- (13) <http://www.smf.mx/boletin/2006/Bol-20-1/Articulos/sol-gel.htm>
- (14) [http://www.lummel.de/en/lummel\\_deu01.htm](http://www.lummel.de/en/lummel_deu01.htm)
- (15) [http://www.articulosya.com/article/2771/Titanio\\_-\\_%C2%BFQu%C3%A9\\_papel\\_desempe%C3%B1a\\_en\\_la\\_construcci%C3%B3n%3F.aspx](http://www.articulosya.com/article/2771/Titanio_-_%C2%BFQu%C3%A9_papel_desempe%C3%B1a_en_la_construcci%C3%B3n%3F.aspx)
- (16) <http://eps.cdf.udc.es/>

- (17)<http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/QU00902M.pdf>
- (18)<http://www.fym.es/ES/Nuestros+Productos/TX+Active%C2%AE/Home.htm>
- (19)[http://www.techreview.com/printer\\_friendly\\_article.aspx?id=16963](http://www.techreview.com/printer_friendly_article.aspx?id=16963)
- (20)<http://www.azom.com/news.aspx?newsID=935>
- (21)[http://lofi.forum.physorg.com/FFC-Cambridge-Titanium-Electrolytic-Production-Pro\\_220.html](http://lofi.forum.physorg.com/FFC-Cambridge-Titanium-Electrolytic-Production-Pro_220.html)
- (22)<http://www.springerlink.com/content/w468687646482211/>
- (23)<http://www.arq.com.mx/noticias/Detalles/1283.html>
- (24)[http://www.timet.com/index\\_new.htm](http://www.timet.com/index_new.htm)
- (25)<http://www.mineranet.com.ar/titanio.asp>
- (26)[http://www.metalprices.com/pubcharts/Public/Titanium\\_Price\\_Charts.asp](http://www.metalprices.com/pubcharts/Public/Titanium_Price_Charts.asp)
- (27)<http://www.metalysis.com/>

## Normativa

EN 13947:2006 Thermal performance of curtain walling – Calculation transmittance

EN 12412-2, Thermal performance of windows, doors and shutters – Determination of thermal transmittance by hot box method – Part 2: Frames

EN ISO 10077-1:2006, Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1: General (ISO 10077-1:2006)

EN ISO 10077-2:2003, Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames (ISO 10077-2:2003)